

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de um Medidor de Vazão Mássica Não
Intrusivo por Método Termográfico**

Jonatas Motta Quirino

Orientadores:
Professor José Paulo Vogel
Professora Gisele Vieira

**Rio de Janeiro,
Junho de 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de um Medidor de Vazão Mássica Não
Intrusivo por Método Termográfico**

Jonatas Motta Quirino

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como requisito parcial dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientadores:
Professor José Paulo Vogel
Professora Gisele Vieira

**Rio de Janeiro,
Junho de 2015**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Q8 Quirino, Jonatas Motta
Análise de um medidor de vazão mássica não intrusivo por método termográfico / Jonatas Motta Quirino.—2015.
xiii, 65f. + apêndice e anexos : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f.64-65
Orientadores : Jose Paulo Vogel
Gisele Vieira

1. Engenharia mecânica. 2. Medidores de fluxo. 3. Tubos de cobre – Efeito da temperatura. I. Vogel, José Paulo (Orient.). II. Vieira, Gisele (Orient.). III. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, detentor de toda a sabedoria, que me permitiu alcançar êxito até aqui.

Ao mestre José Paulo Vogel, que me motivou a desenvolver o potencial máximo deste projeto, onde eu mesmo não via tais possibilidades.

Ao meu irmão Tiago, que trabalhou comigo, como meu mestre, onde suas orientações ecoarão em meu conhecimento para sempre.

Ao meu pai Eliezer, que mesmo sem entender como tudo funcionaria, sempre esteve extremamente disposto e entusiasmado a tudo que me levasse ao sucesso, sem medir esforços.

A minha mãe Lilian, que foi minha incansável revisora, onde suas sugestões levaram ao aprimoramento deste trabalho.

A minha irmã Lília, e meus padrastos Dalva e Armando, que sofreram comigo e certamente celebrarão a minha vitória.

Ao meu colega de faculdade Jorge Neto, que foi incansável para realizarmos os testes laboratoriais necessários para o projeto.

Aos meus amigos Hellen, Caio, Rômulo, Raphael, Polyanna, Felipe, Rebeca, Lucas, Marcos Guilherme, e tantos outros aos quais o apoio e companheirismo eu sempre serei grato.

Ao CEFET/RJ e seu corpo de docentes, que me concederam o conhecimento técnico e as ferramentas necessárias para que eu alcançasse o êxito máximo

RESUMO

A utilização de substâncias fluidas percorre uma grande quantidade de áreas dentro do campo de estudo da Engenharia Mecânica, sendo possível até mesmo detectar tal necessidade em outras áreas, como a medicina. Por tal utilização ser crescente em diversos estudos, gerou-se a necessidade da medição de grandezas relativas ao transporte de tais fluidos, como velocidade e vazão. Os medidores de vazão existentes no mercado, em sua maioria, possuem a limitação de promover a medição, contando com a necessidade de haver contato entre o fluido em escoamento e o elemento sensor do instrumento de medição, conhecida como intrusividade. A presente proposta prevê um método que possua eficiência igual ou maior à dos medidores existentes no mercado, atentando principalmente para evitar a ocorrência da intrusividade, sendo, portanto, importante promover a medição pelo efeito térmico provocado na superfície de um tubo de cobre por um sistema de controle e aquisição de dados.

Palavras-chave: Medidor, Vazão, Térmico.

ABSTRACT

The use of fluid substances covers many areas within the Mechanical Engineering field of study, and it can even detect such a need in other areas, such as medicine. For this use is increasing in several studies, it has generated the need of the measured variables for the transport of fluids such as speed and flow. The flow meters are on the market, in most cases, have the limitation of promoting measuring, with the need for contact between the fluid and flow-measuring instrument of the sensor element, known as intrusiveness. This proposal provides a method that has efficiency equal to or greater than the existing meters on the market, paying attention mainly to prevent the occurrence of intrusiveness, is therefore important to promote the measurement effect caused by heat on the surface of a copper tube by a system control and data acquisition.

Keywords: Meter, Flow, Thermal.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Metodologia.....	2
1.4 Objetivos.....	2
2. Medidores de vazão	4
2.1 Medidores Diretos	7
2.1.1 Deslocamento positivo	7
2.1.2 Impacto de fluido.....	8
2.2 Medidores Indiretos	9
2.2.1 Pressão diferencial.....	10
2.2.2 Área variável.....	11
2.3 Medidores especiais.....	12
2.3.1 Eletromagnético.....	12
2.3.2 Ultrassônico	13
2.3.3 Vortex	15
2.3.4 Coriolis	16
2.3.5 Termal.....	17
3. Descrição analítica da medição termal	19
3.1 Métodos de medição de vazão termal.....	20
3.1.1 Quantidade de calor	20
3.1.2 Tempo de trânsito	21
3.1.3 Oscilação térmica	21
3.1.4 Calorimetria.....	22

3.2 Descrição do perfil de temperaturas	24
4. Experimentação	32
4.1. Componentes	33
4.1.1 Tubo de cobre	33
4.1.2 Filamento resistivo de Tungstênio.....	33
4.1.3 Emissor de fluxo.....	34
4.2 Simulação	35
4.3 Protótipo	36
4.3.1 Placa de aquisição de dados	36
4.3.2 Fonte de alimentação	37
4.3.3 Tubo de cobre	38
4.3.4 Filamento resistivo	38
4.3.5 Emissor de fluxo.....	39
4.3.6 Procedimento	40
4.4 Dimensionamento.....	41
5. Análise dos resultados	44
5.1 Monitoramento de valores	44
5.1.1 Fornecimento de calor	44
5.1.2 Emissão de fluxo de ar.....	45
5.2 Aquisição de resultados	46
5.2.1 Câmera termográfica	46
5.3 Processamento de resultados	48
5.3.1 Determinação das características do perfil	52
5.3.2 Inclinação do perfil.....	53
5.3.3 Diferença de inclinações.....	55
5.3.4 Áreas do perfil	57

5.3.5 Diferença de áreas	59
5.5 Comparação entre os resultados do MRL.....	60
6. Conclusão	62
APÊNDICE A: Código de monitoramento e controle.....	66
ANEXO A: Catálogo de tubos de cobre.....	67
ANEXO B: Especificações da placa de aquisição de dados (Arduino)	68
ANEXO C: Especificações do transistor de controle (TIP122)	69
ANEXO D: Especificações do sensor térmico de precisão (LM35)	70
ANEXO E: Especificações da câmera termográfica (A320)	71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Regimes de escoamento.....	5
FIGURA 2: Classificação de medidores comerciais	6
FIGURA 3: Tipos de medição.....	6
FIGURA 4: Medidor de deslocamento positivo por Lóbulos rotativos	8
FIGURA 5: Medidor de Impacto de fluido tipo Hélice.....	8
FIGURA 6: Medidores de pressão diferencial	10
FIGURA 7: Medidor de Área variável por Rotâmetro.....	11
FIGURA 8: Funcionamento de um medidor Eletromagnético.....	13
FIGURA 9: Funcionamento de um medidor por Efeito Doppler	14
FIGURA 10: Funcionamento do medidor por Vortex.....	15
FIGURA 11: Medidor por efeito Coriolis	16
FIGURA 12: Medidor por termoresistências	18
FIGURA 13: Fluxograma do princípio de medição	19
FIGURA 14: Representação do Anemômetro.....	20
FIGURA 15: Representação do Tempo de trânsito.....	21
FIGURA 16: Representação do Anemômetro.....	22
FIGURA 17: Gráficos gerados pelas medições.....	22
FIGURA 18: Perfis de temperatura de calorimetria.....	23
FIGURA 19: Representação análoga em circuitos elétricos	25
FIGURA 20: Representação da condução tubular	26
FIGURA 21: Efeito de condução térmica tubular	28
FIGURA 22: Gráfico de temperaturas.....	31
FIGURA 23: Tubo de cobre para simulação	33
FIGURA 24: Representação do fio resistivo posicionado no tubo de simulação	34
FIGURA 25: Modelo sólido do <i>cooler</i>	35
FIGURA 26: Sistema usado na simulação	35
FIGURA 27: Placa de aquisição de dados.....	37
FIGURA 28: Fonte de alimentação	37
FIGURA 29: Tubo de cobre	38
FIGURA 30: Filamento de tungstênio	39
FIGURA 31: Emissor de fluxo de ar	39

FIGURA 32: Protótipo montado	40
FIGURA 33: Representação das medidas do emissor de fluxo.....	41
FIGURA 34: Medidas geométricas do cone de redução de diâmetro	42
FIGURA 35: Esquema das medidas do corpo do medidor dimensionado	43
FIGURA 36: Gráfico de variação dos valores de vazão	46
FIGURA 37: Bancada de testes termográficos	47
FIGURA 38: Imagem com <i>range</i> térmico desajustado.....	47
FIGURA 39: Imagem de distribuição térmica inicial	48
FIGURA 40: Imagem da distribuição térmica final	48
FIGURA 41: Gráfico comparativo entre valores medidos e calculados	49
FIGURA 42: Gráfico de valores de vazão.....	51
FIGURA 43: Diagrama de blocos do processo de inferência da vazão	51
FIGURA 44: Aplicação das estratégias de regressão e ajuste.....	51
FIGURA 45: Análise de pontos de teste ao longo do tubo	52
FIGURA 46: Inclinação de regiões do perfil	53
FIGURA 47: Gráfico de vazões pelo método de Inclinações do Perfil.....	54
FIGURA 48: Representações de vazões medidas e calculadas.....	54
FIGURA 49: Erro de Inclinações do Perfil	55
FIGURA 50: Gráfico de vazões pelo método de Diferença de Inclinações.....	56
FIGURA 51: Erro de Diferença de Inclinações.....	56
FIGURA 52: Áreas do perfil	57
FIGURA 53: Gráfico de vazões pelo método de Áreas	58
FIGURA 54: Erro de Áreas do Perfil	58
FIGURA 55: Gráfico de vazões pelo método de Diferença de Áreas.....	59
FIGURA 56: Erro de Diferença de Áreas	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Relação entre valores do código e valores de vazão	45
TABELA 2: Comparação dos erros relativos e proporções	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Corrente Alternada

AP – Área do Perfil

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*

CAD – *Computer Aided Design*

CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica

DA – Diferença de Áreas

DC – Corrente Contínua

d.d.p. – Diferença De Potencial

DI – Diferença de Inclinações

DP – *Differential Pressure*

f.e.m – Força Eletromotriz

LACTM – Laboratório do Comportamento Termomecânico dos Materiais

MATLAB – *Matrix Laboratory*

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

MRL – Modelo de Regressão Linear

NBR – Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas

IP – Inclinação do Perfil

ISO – *International Organization for Standardization*

TOF – *Time Of Fly*

USB – *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c – Área de condução

c_p – Calor específico a pressão constante

Δ – Variação

E – Módulo de elasticidade

\dot{E} – Taxa de transferência de energia

ε – Erro medido

f – Frequência

G – Módulo de cisalhamento

ρ – Massa específica

ρ_T – Resistividade

k – Condutividade térmica

L – Distância

\dot{m} – Vazão mássica

m – Massa

\dot{q} – Potência

Q – Quantidade de calor

t – Tempo

T – Temperatura

θ – Ângulo

r – Raio

R – Resistência

R^2 – Erro quadrático

z – Comprimento axial

Capítulo 1

Introdução

O setor da indústria demanda cada vez mais por métodos excelentes para transporte de fluidos. Desde grandes tubulações de água ou gases para o abastecimento predial, até oleodutos e tubulações hospitalares para o transporte de oxigênio.

Para atender essa demanda, determinadas características devem ser precisamente levantadas, como viscosidade, densidade, velocidade de fluxo, regime de escoamento, temperatura de fluido, entre outras.

O fenômeno que permite tal transporte é conhecido como vazão e sua medição é de extrema relevância, seja para controle de gastos, no caso de fornecimento residencial, ou para doseamento, para tratamentos hospitalares. Em todos os projetos e operações que envolvem transporte de fluidos, é imprescindível projetar a instalação, operação, exatidão, precisão, custo, sensibilidade do sensor, confiabilidade, entre outras.

1.1 Motivação

Atualmente existem diversas pesquisas em nível industrial para aprimorar os métodos atuais de medição de vazão e propor novos métodos que atendam necessidades específicas, ou superem limitações encontradas nos métodos existentes.

A classificação dos medidores pode ser estruturada de diversas formas, dadas as características de operação de cada medidor. Contudo a classificação mais básica se dá de acordo com o contato que o instrumento de medição possui ou não com o fluido em escoamento e, portanto, analisando se há perturbação ao escoamento.

Tal perturbação acarreta uma série de prejuízos ao fluxo de escoamento e, conseqüentemente, desvantagens ao medidor em estudo.

De acordo com essa classificação, havendo obstrução imposta do medidor ao escoamento, tal medidor é chamado Intrusivo; e se em função do processo de medição, existe alteração das características físicas do fluido, o medidor é dado como Invasivo.

1.2 Justificativa

A intrusividade do medidor provoca alteração no regime de escoamento do fluido, além de perda de carga, que consiste na perda da energia fluidodinâmica no sistema, podendo assim, comprometer a exigência de projeto de vazão.

O parâmetro mais importante a ser observado acerca do desenvolvimento do medidor do presente trabalho se concentra na intrusividade, pois é atentando para tal parâmetro que torna-se possível sobrepujar tal obstáculo.

Portanto procura-se desenvolver um medidor que permita a leitura da vazão mássica sem que haja contato do próprio medidor com o fluido em escoamento, mesmo que altere qualquer propriedade física do fluido.

1.3 Metodologia

O método utilizado neste trabalho é o termal, que apresenta diversas vantagens sobre os demais, por ser não-intrusivo e possuir sensibilidade suficiente para a medição numa ampla gama de fluidos.

Os medidores de vazão termal valem-se da relação entre a transferência de calor e a vazão mássica, baseando-se no princípio da convecção forçada em um tubo de escoamento. De acordo com o princípio de medição, os medidores de vazão termal podem ser divididos em três categorias principais: calorimétricos, por tempo de voo (TOF) e os anemômetros térmicos.

O princípio do calorímetro é baseado na mudança do perfil de temperaturas próximo ao elemento aquecedor pelo fluxo de fluido. As características de assimetria, do aquecimento, do perfil térmico no escoamento podem ser usadas para determinar a vazão.

O método termográfico consiste em analisar graficamente o comportamento térmico existente no fluido em escoamento no interior do tubo e na superfície do mesmo.

Para determinação dos parâmetros do modelo matemático proposto, os Algoritmos Genéticos apresentam grande potencialidade, pois possuem a capacidade de procurar soluções ótimas para um dado problema. Utilizando os dados de temperaturas por posição e vazão definem-se os parâmetros que resultem menor erro no modelo.

1.4 Objetivos

Este trabalho visa analisar um medidor de vazão termal para baixas vazões de ar em pequenos diâmetros, onde os testes serão realizados através de modelagem sólida computacional, aliada ao protótipo desenvolvido, utilizando o princípio da termografia.

Através dos resultados gerados pelos efeitos térmicos combinados, é possível realizar uma análise computacional por meio de um método estatístico adequado, para que dessa forma possa-se adequar parâmetros, a fim de que finalmente os dados térmicos possam ser lidos como dados de vazão mássica.

Todos os elementos utilizados devem ser compactos o suficiente para possibilitar seu deslocamento, não limitando o potencial de avaliação dos parâmetros em questão e atender a valores de erro relativo dentro dos limites aceitáveis, uma vez comparados com medidores de vazão que já existam disponíveis no mercado.

Capítulo 2

Medidores de vazão

Para abordar sobre sistemas de vazão e os instrumentos existentes para medi-la, deve-se primeiramente conceituar o que se entende por vazão. Sua definição se dá como a quantificação de fluido escoando através de um trecho de tubulação por um determinado período de tempo, sendo assim, uma grandeza concernente à velocidade de frações volumétricas. Pode-se então medir diretamente a vazão pela quantidade vezes que um volume conhecido é preenchido por frações volumétricas do fluido em um intervalo de tempo, ou pela velocidade de impacto do fluido.

Ao avaliar a vazão na perspectiva do movimento e sendo o escoamento envolvido por um tubo é possível perceber o efeito de perda de carga ao longo do canal pela queda de pressão infligida à corrente do fluido. Entre as principais causas desta perda pode-se citar o atrito entre o fluido e a parede interna do tubo e mudanças de pressão e velocidade provocadas por obstáculos (Albertarazzi, 2008).

O movimento definido como escoamento provoca um atrito entre o fluido em movimento e a parede do tubo e descreve um perfil de velocidades transversal ao próprio escoamento, sendo que tal perfil de velocidades apresenta valor máximo no eixo central da seção transversal do tubo e valor mínimo na parede do tubo. Uma vez que não há relação funcional entre este tipo de perfil e a vazão, o conceito determina maior importância no desenvolvimento e otimização dos atuais métodos de medição de vazão, como representado na Figura 1, já que, de acordo com as condições do movimento do fluido, pode-se descrever duas classificações de perfil:

Regime Laminar - Descrição da velocidade com consideráveis diferenças, sem passagem das partículas do fluido na direção transversal ao movimento.

Regime Turbulento - Descrição da velocidade aproximadamente uniforme com oscilações de velocidade e pressão nas partículas ocasionando mistura do fluido.

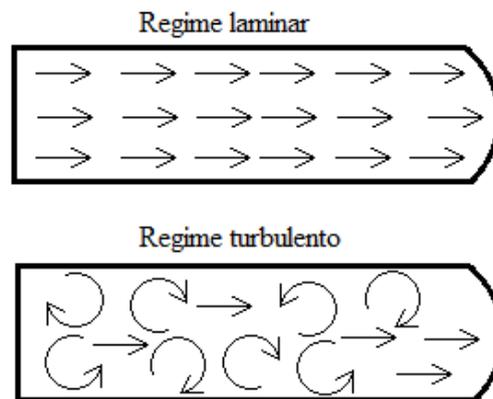


Figura 1: Regimes de escoamento

Barreiras físicas existentes ao longo do escoamento geram alterações na perda de carga do escoamento, onde mantem-se a área de seção transversal do fluxo, ou altera-se a área e mantem-se a perda de carga uniforme. A relação entre tais grandezas e a velocidade do escoamento é funcional, portanto por meio de equações apropriadas torna-se possível definir a vazão de forma indireta.

De acordo com o princípio físico usado, os medidores de vazão desenvolvidos classificam-se como medidores diretos ou medidores indiretos, segundo Cassiolato (2008), conforme o elemento sensor mede a quantidade de volume diretamente ou infere a vazão através da detecção da perda de carga.

Há vários conceitos físicos, além da perda de carga, provocados pelo movimento do fluido em confinamento tubular. Tais conceitos podem ser aplicados para medir indiretamente a vazão de escoamento de acordo com relações especiais, acrescentando uma nova classificação: medidores especiais.

Os medidores de vazão existentes são constituídos essencialmente por três partes: elemento primário, que trabalha pelo contato com o fluxo; elemento secundário, imbuído de prover sinais que podem ser de natureza mecânica ou eletrônica, e que carrega a informação da relação entre o elemento primário e o escoamento; e o computador de vazão que lê e interpreta o sinal gerado do valor de vazão.

A Figura 2 ilustra uma das principais formas de classificação dos medidores de vazão existentes atualmente no mercado.

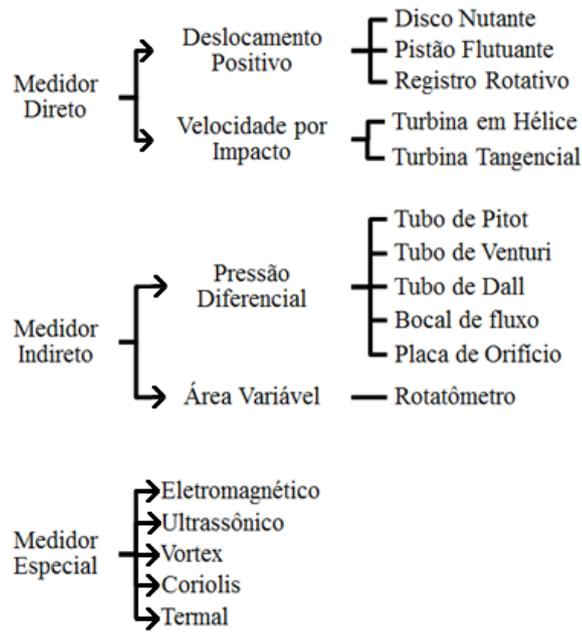


Figura 2: Classificação de medidores comerciais

A principal limitação que este trabalho procura vencer é o contato necessário entre o elemento primário e o fluxo, gerando assim perturbações no escoamento, principalmente perda de pressão. Ante o exposto, a maioria dos medidores especiais visa eliminar a perda de pressão em função do contato entre o sensor e o fluido, já que a maioria dos medidores especiais não depende do contato do elemento primário com o fluido.

Em função da variedade de formas de medição, faz-se possível caracterizar os medidores quanto à perturbação gerada e ao contato físico. A Figura 3 apresenta como o processo de medição pode ser realizado, já que o sensor pode ser considerado Intrusivo ou Não-Intrusivo, dependendo da obstrução ao escoamento e ainda, Invasivo ou Não-Invasivo, pelo rompimento das barreiras físicas.

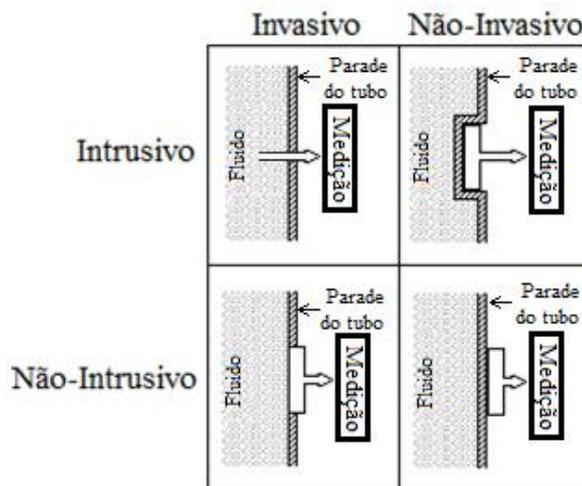


Figura 3: Tipos de medição

A influência do medidor ainda pode ser analisada pela troca de energia entre o instrumento e o escoamento. Neste caso, os medidores diretos e indiretos extraem energia da corrente do fluido, mas é possível para os medidores diretos fornecerem energia caso o estímulo à rotação seja externo. Por outro lado, os medidores especiais, na sua maioria, necessitam fornecer algum tipo de energia ao fluido ou ao escoamento, na forma de calor, ondas sonoras, ondas eletromagnéticas, etc. (Quirino, 2015)

A seguir serão apresentados alguns medidores exemplificando os princípios de funcionamento apresentados, e principalmente os tipos de medidores considerados interessantes para este trabalho.

2.1 Medidores Diretos

De acordo com comentários anteriores, os medidores de vazão diretos utilizam uma das duas técnicas: Medição direta da vazão pela detecção da frequência de preenchimento de um volume determinado, através de um elemento sensor; ou velocidade do choque do fluido em escoamento com o elemento sensor.

2.1.1 Deslocamento positivo

Chamados de medidores volumétricos, os Medidores de Deslocamento Positivo possuem, na maioria, boa precisão na medição, por isso esses equipamentos são muito utilizados na indústria e no comércio para a medição de vazões de água e em pesquisas laboratoriais, com gases e outros líquidos.

Das vantagens na utilização, pode-se relacionar: baixa mudança na precisão em escoamentos com variação de velocidade de fluxo; não depender das características físico-químicas do fluido. Das desvantagens elenca-se: dependência de alterações de dimensões para medições de diferentes valores de vazão; perda de carga pela Intrusividade do método; e a dependência da ausência de suspensões no fluido.

Existem disponíveis no mercado diversos tipos de Medidores de Deslocamento Positivo, porém existem aqueles que são mais utilizados, destacando-se três: Disco Nutante, Pistão Flutuante e Lóbulos Rotativos (Figura 4), que por ser o mais comum desses, será o exemplo analisado a seguir.

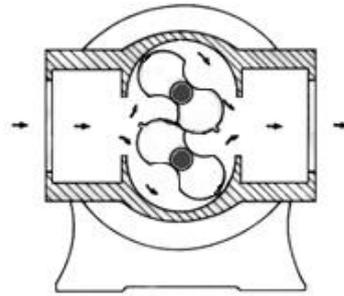


Figura 4: Medidor de deslocamento positivo por Lóbulos rotativos

O princípio fundamental de um Medidor de Vazão com Lóbulos Rotativos é descrito pelo contato do fluido nos rotores (lóbulos), impondo movimento neles. Os lóbulos são impulsionados a um movimento rotativo, no qual a frequência de rotação se relaciona com a vazão do escoamento.

Os Medidores de Deslocamento Positivo apresentam a melhor precisão de medição no Medidor de Lóbulos Rotativos, alcançando precisão máxima no valor de aproximadamente 0,05% de erro de fundo de escala.

2.1.2 Impacto de fluido

O princípio de medição por Impacto de Fluido determina a vazão através da velocidade de colisão do escoamento numa placa de medição, como apresentado na Figura 5, a qual, é submetida ao deslocamento em consequência da vazão do fluido. Mede-se maiores velocidades de impacto, por maiores valores de vazão.

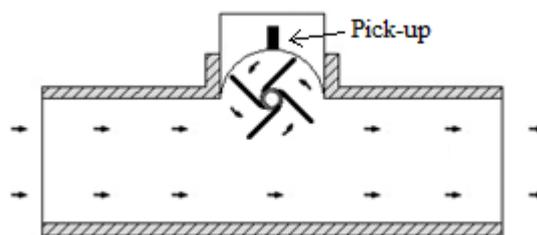


Figura 5: Medidor de Impacto de fluido tipo Hélice

Das vantagens desse método de medição, destaca-se a aplicabilidade em diversas situações, já que geralmente esses medidores são compactos e leves, se forem comparados com a tubulação na qual ele está instalado.

Verifica-se uma taxa de precisão na medição de fundo de escala em torno de 1% nas aferições com esse medidor. Além da constância de boa precisão em fluidos de diferentes pressões e temperaturas.

Em geral esses medidores são de montagem complexa, fazendo com que haja necessidade de atender uma série de fatores relacionados à montagem do medidor de forma satisfatória.

Encontra-se esse tipo de medidor com sensores, também conhecidos como *pick-up*, magnéticos ou ópticos, onde o magnético funciona pela emissão de uma tensão elétrica, que pulsa no momento em que o polo se aproxima a um elemento magnético. Enquanto isso, o *pick-up* óptico identifica a interrupção de uma emissão luminosa, e a vazão pode ser lida quando a turbina se aproxima do sensor, provocando uma sombra para gerar tais pulsos elétricos.

Como o medidor é intrusivo ao escoamento do fluido, há desgaste no eixo da turbina rotativa, necessitando calibração e manutenção, as quais, são dispostas nas normas ISO 9951 sobre manutenção e calibração de turbinas para gases e na API MPSMS5/3 sobre hidrocarbonetos líquidos.

O Medidor de Vazão do tipo Turbina de Fluxo Paralelo é mais recorrente por possuir maior aplicabilidade industrial, como os hidrômetros prediais, além da Roda de Pelton e da Turbina Woltman, que são os mais populares exemplos de aplicação desse tipo de Medidor.

Os medidores por impacto de fluido possuem aplicabilidade que passa desde medições de consumo de combustíveis, até tratamentos de efluentes e transferência de custódia de líquidos, pois o medidor é facilmente adaptável a muitos tipos de tubulações.

2.2 Medidores Indiretos

Medidor Indireto é o que se determina pela medição através da leitura de fenômenos físicos controlados, onde há relação entre a interpretação de tais fenômenos com a vazão.

Os fenômenos físicos dos quais tais sensores dependem para realizar a medição, também os classificam; em dois tipos: os de área constante e os de área variável.

Nos medidores de área constante, existe uma perda de carga variável oriunda de um fluxo controlado, acarretando num diferencial de pressão, que por sua vez, pode ser usada para o cálculo da vazão.

Para os medidores de área variável, a carga não se altera, provocando variações na área, de acordo com o escoamento do fluido, o que permite a medição através da alteração na área em que o fluido está contido.

2.2.1 Pressão diferencial

O funcionamento desses medidores baseia a medição da vazão por pressão diferencial (DP), que consiste em posicionar barreiras ao escoamento do fluido, a fim de provocar uma variação na pressão do fluido contido no medidor. De tal forma, pode-se aferir o valor do escoamento do fluido.

A estrutura dos medidores de Pressão Diferencial forma-se a partir de um elemento primário e um transmissor de pressão diferencial, no qual o elemento primário gera redução na área de seção reta do fluxo a fim de que, assim o transmissor faça a medição da variação de pressão à jusante e à montante do estreitamento de área, com valores pré-determinados.

Dos medidores DP existentes, pode-se destacar os Tubos de Pitot, Tubos Venturi, Placas de Orifício, Bocal de Fluxo e Tubo de Dall, os quais são apresentados na Figura 6.

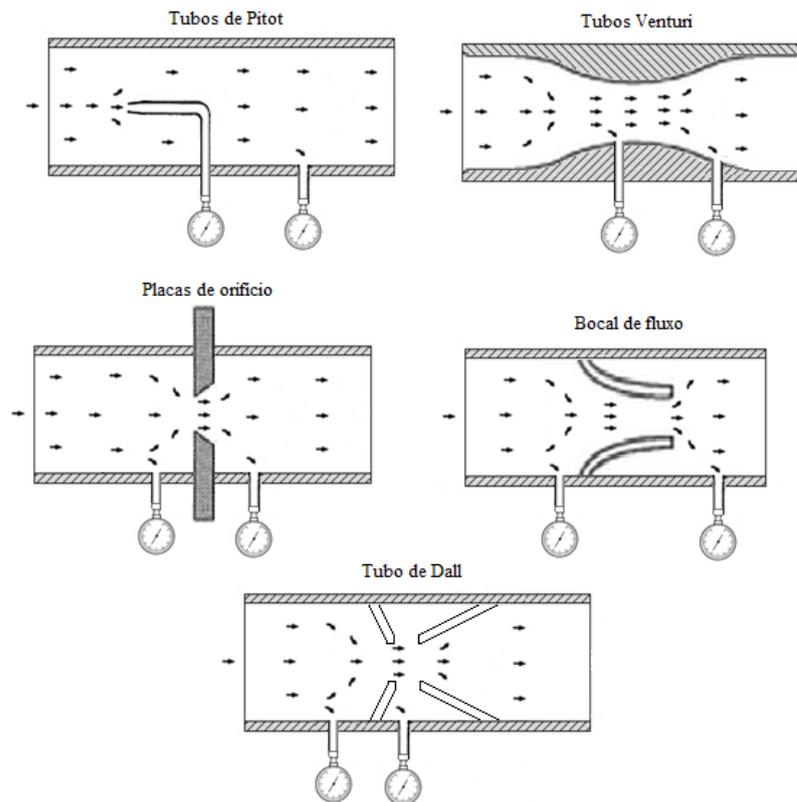


Figura 6: Medidores de pressão diferencial

O medidor Venturi é o mais utilizado, dentre os medidores DP, em função de suas vantagens de aplicação, como por exemplo: Ampla aceitação e entendimento na indústria; Facilidade de usinagem; e aplicabilidade para medição em grandes tubulações.

Contudo esse modelo de medição ainda apresenta desvantagens, tais como altas perdas de carga, se comparado aos outros modelos (em torno de 20% de ΔP); limitação quanto à geometria da tubulação, e necessidade de longos trechos retos.

Em termos de precisão na medição, os tubos Venturi apresentam precisão razoável, com erro girando em torno de 0,75% de fundo de escala.

2.2.2 Área variável

Esse equipamento realiza a medição da vazão ao dispor em seu interior de um espaço para o fluxo, de forma que esse espaço pré-determinado esteja em função da vazão analisada.

A área varia de forma controlada através de um dispositivo obturador, que amplia ou diminui a área de permissão de passagem do fluido em questão.

Usualmente, encontra-se apenas um tipo de medidor de vazão por área variável, chamado Rotâmetro (Figura 7), embora existam outros tipos quase nunca utilizados.

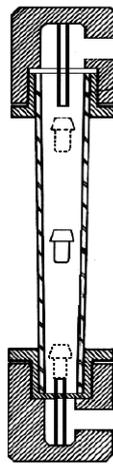


Figura 7: Medidor de Área variável por Rotâmetro [21]

O Rotâmetro é composto basicamente de uma parte flutuante, chamada de boia, que se localiza internamente no medidor, sendo esse obrigatoriamente vertical, e que em cuja variação proporcional à vazão, torna-se possível sua medição.

Os medidores Rotâmetro são amplamente empregados em instalações em que exista trecho em escoamento vertical, possibilitando, em alguns casos, instalação direta na tubulação.

Das vantagens desse modelo de medição, destacam-se o baixo custo de fabricação e facilidade de construção e montagem; e a dispensa de uma fonte de alimentação, visto que a medição se dá de forma mecânica, aproveitando apenas a força gravitacional.

Mesmo diante do exposto, esse modelo possui diversas limitações e desvantagens, como por exemplo a necessidade de montagem em posição vertical; a insensibilidade da medição quanto à natureza do fluido, portanto não é possível alterar a viscosidade ou a densidade do fluido numa mesma medição.

O fato do fluido alterar espontaneamente suas propriedades físicas ao longo do tempo, faz com que a incerteza da medição se torne considerável, alcançando, nos melhores equipamentos, a faixa de 2% de fundo de escala.

2.3 Medidores especiais

Uma vez que os medidores expostos até aqui apresentaram vários infortúnios, que limitam a aplicação, faz-se necessário o desenvolvimento de outros medidores que vençam tais limitações. Esses medidores com funcionamento alternativo aos expostos até aqui são conhecidos como Medidores Especiais.

Como tais aplicações são fundamentais para a indústria ou pesquisas laboratoriais, existe a demanda de medidores capazes de sobrepujar tais limitações implícitas nos medidores comuns e superem tais limitações, principalmente a exigência do elemento sensor estar em contato com o fluido em escoamento, o que acarreta uma inevitável queda de pressão na tubulação.

2.3.1 Eletromagnético

A medição pelo processo eletromagnético representa um dos medidores mais utilizados em instalações sofisticadas, pois não depende das características de composição do fluido, sendo, o que possibilita a medição em fluidos com sólidos em suspensão.

Tal favorecimento é concedido pelo princípio da não-intrusividade, já que esse método não necessita de contato direto com o fluido, otimizando o escoamento e não gerando perturbações e tampouco perdas de carga.

O princípio físico que permite o funcionamento dos medidores de vazão eletromagnéticos é a Lei da Indução Magnética de Faraday, que propõe que o movimento de um condutor no interior de um campo magnético e ortogonal ao mesmo, gere uma força eletromotriz (f.e.m.), e tal velocidade de movimento está relacionada de forma diretamente proporcional.

Por ser um processo de leitura de uma grandeza físico-química, faz-se necessário uma condição mínima em suas características, que no caso, a condutividade elétrica do fluido não pode ser menor que $200\mu\text{S/m}$, de acordo com Awwa (1989), o que restringe a aplicação desse medidor para fluidos que não obedeçam à tal exigência.

Procedimento de medição consiste na geração de um campo eletromagnético perpendicular ao escoamento, onde localiza-se um condutor magnético, que provoca uma

f.e.m., que pode ser atrelada em função da velocidade do fluxo, como está representado na Figura 8, onde a diferença de potencial (d.d.p.) se relaciona proporcionalmente à vazão, de forma que esta possa ser facilmente determinada.

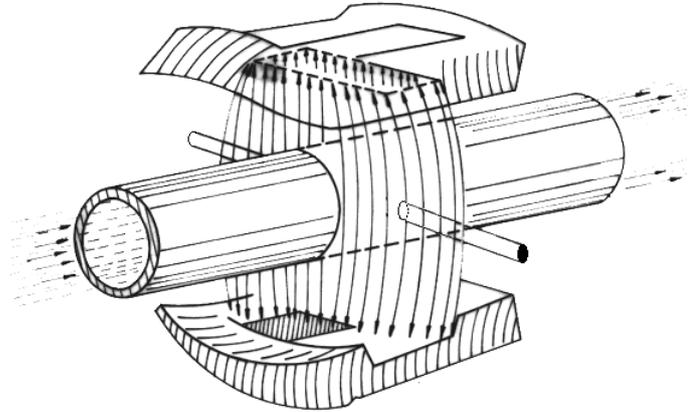


Figura 8: Funcionamento de um medidor Eletromagnético [21]

A composição dos medidores eletromagnéticos consiste basicamente numa bobina, que gera o campo magnético para o funcionamento do processo; eletrodos que fazem variar tal campo magnético, produzindo a força eletromotriz necessária, que por sua vez será enviada para o circuito visando converter o sinal para a leitura da vazão.

A utilização desse medidor encaixa-se em diversos tipos de aplicação, em uma ampla gama de fluidos, já que como comentado acima, a medição eletromagnética não tem sua precisão afetada pela presença de suspensões no fluido, portanto é possível utilizar este medidor para fluidos como ácidos, bases, polímeros, lamas, dentre outros, desde que possuam a condutividade elétrica mínima como citado acima. Não se aconselha o uso, porém, ao tratar-se de líquidos com hidrocarbonetos ou materiais orgânicos em sua composição.

Em termos de precisão, pode-se dizer que este método é muito preciso, pois possui taxas de erro em torno de 1%, de acordo com a condutividade elétrica do fluido em questão.

2.3.2 Ultrassônico

Ao tratar-se das propriedades físico-químicas de um determinado fluido, os medidores de vazão ultrassônicos apresentam grande aplicabilidade, já que não é intrusivo, aumentando as possibilidades de aplicação em instalações.

Se comparado ao medidor eletromagnético, apresentado anteriormente, destaca-se a vantagem da independência da condutividade elétrica no fluido, além de não ter contato direto com o fluido, portanto as suspensões do fluido e a viscosidade não afetam a medição.

No método de medição por ultrassom, existem alguns tipos distintos de formas de medição onde todos leem a vazão volumétrica, com princípios físicos diferentes, que são selecionados de acordo com as nuances da aplicação em questão. Alguns dos exemplos mais comuns são o Tempo de Trânsito (Figura 9), Efeito Doppler e Correlação Cruzada. Desses três, destaca-se o Efeito Doppler.

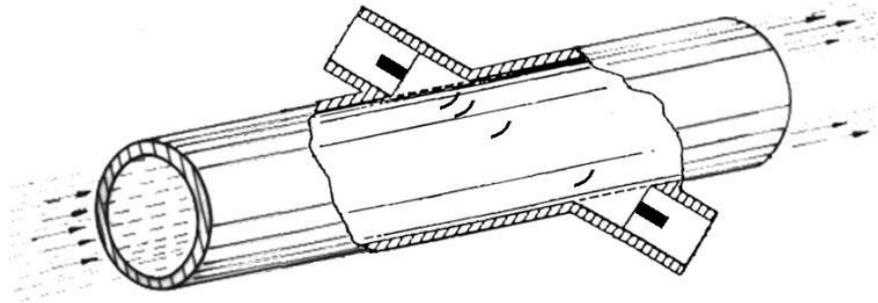


Figura 9: Funcionamento de um medidor por Ultrassom

A operação do medidor se baseia na geração de ondas sonoras de frequência pré-definida atravessando o fluxo, as quais são refletidas por elementos refletoras, e em seguida, captadas pelo transdutor de recepção.

A análise do sinal captado acontece relacionando a frequência do sinal captado e a frequência emitida, que é conhecida. Essa diferença entre as frequências varia de forma diretamente proporcional à velocidade de escoamento do fluido, permitindo a determinação da vazão (Hauptmann, 2001).

As vantagens desse método relacionam-se especialmente pela não-intrusividade, e, portanto, a medição não sofre nenhum tipo de influência devido às características físico-químicas do fluido, e não gera variação na carga ou na pressão de escoamento.

O método é tido como um dos de maior eficácia, pois possui poucas desvantagens consideráveis, as quais pode-se citar o altíssimo custo, principalmente ao se tratar de tubulações de pequeno diâmetro; o fato de alterações de temperatura e densidade afetarem a condutividade sônica; e as paredes do tubo poderem afetar a captação do transdutor.

Como em todos os outros casos, as vantagens e desvantagens do processo determinam as aplicações para as quais os medidores são normalmente utilizados. Como o medidor não está em contato direto com o fluido, esse método é excelente para fluidos poluídos com partículas em suspensão, que possuam condutividade sônica mínima, tais como esgotos, lodo, etc. É um dos medidores mais apropriados para sistemas em que baixas quedas de pressão aconteçam.

Em termos de precisão do método, conclui-se que possui baixos níveis de incerteza, se comparado a outros métodos, alcançando cerca de 0,5% do valor lido.

2.3.3 Vortex

O efeito vortex (ou vórtice) foi descoberto por Leonardo da Vinci no século XVI, e foi aperfeiçoado posteriormente, em 1912 por Bernard T. von Karman, que observou que obstáculos cilíndricos postos ortogonalmente a um fluxo geram padrões circulares ao redor de um centro rotacional. Tal fenômeno se dá em função de diferenciais de pressão num fluido, o qual busca o equilíbrio do fluxo, alterando a direção do escoamento e assim gerando o efeito descrito.

O medidor de vazão do tipo vortex funciona através do posicionamento de barreiras parciais ao escoamento, para que assim gere turbulências no fluxo, que é explicitado na Figura 10. Essas turbulências descrevem uma frequência determinada, que, uma vez detectada por um elemento sensor, torna viável a medição da vazão.

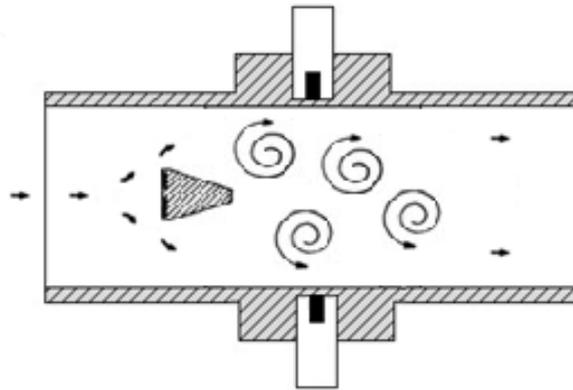


Figura 10: Funcionamento do medidor por vortex

A composição do medidor é semelhantemente simples, onde dentro do tubo de medição coloca-se um obstáculo que pode variar de formato geométrico a fim de atender diferentes tipos de aplicação. E, por fim, sensores piezoelétricos para a determinação da vazão.

O medidor opera de forma que o escoamento seja inicialmente perturbado pelo obstáculo colocado na direção normal do fluxo. O contato do fluido com o obstáculo cria uma divisão no fluxo, formando vórtices alternados. Essa alternância gera uma diferença de pressão, que por sua vez será captada pelos sensores, os quais traduzem a perturbação mecânica em sinais elétricos na forma de pulsos, sendo possível finalmente determinar a frequência dos vórtices e, em consequência, a vazão do fluido.

Por não necessitar de peças de grande porte, nem de sofisticada instalação, este método possui condições favoráveis à sua utilização, pois além do exposto, ainda possui alta precisão, quando em medições de fluidos com baixa viscosidade e mantém sua precisão em amplas faixas de temperatura de fluido, entre -195°C e 450°C .

Já que o funcionamento consiste em aferições de efeitos mecânicos, esse equipamento carrega consigo determinadas limitações. A incidência de ruídos ou vibrações mecânicas de qualquer natureza prejudica a precisão de medição.

O princípio intrusivo de medição gera inevitáveis perdas de carga e tal contato entre o elemento sensor e o fluido em escoamento impossibilita a medição com suspensões no fluido.

A utilização desse medidor alcança principalmente sistemas onde faz-se necessário aferir a vazão de fluidos com temperaturas muito altas como vapor superaquecido ou muito baixas, além de ser muito recorrente em medições higiênicas.

Sobre a precisão do método tem-se que um medidor de vazão vortex possui incerteza de 0,75% do valor medido para fluidos líquidos e 1% do valor medido para vapor e gases.

2.3.4 Coriolis

O engenheiro mecânico Gustave-Gaspard Coriolis definiu uma “força componente complementar à força centrífuga”, que mais tarde ficou conhecida como Força Coriolis (Coriolis, 1835).

O Efeito Coriolis consiste num sistema rotacional uniforme, onde a referência de observação é o ponto central, pois descreve que corpos em movimento, quando observados por um mesmo referencial, estão sujeitos a uma força perpendicular à direção do seu movimento.

Basicamente, o processo de medição pelo efeito Coriolis ocorre quando os eletroímãs localizados nos tubos secundários leem as oscilações geradas, provocando-se uma torção nos mesmos, cuja frequência de oscilação pode ser relacionada com a vazão.

O medidor funciona provocando o Efeito Coriolis por meio de dois movimentos concomitantes do fluido. Ao mesmo tempo, que os dois tubos secundários oscilam em aproximação e afastamento, o fluido realiza um movimento curvo, sendo submetido, portanto à força centrífuga e a Figura 11 representa tal funcionamento. Os medidores mais sofisticados utilizam ainda a diferença de fase aferida em cada extremidade dos tubos secundários.

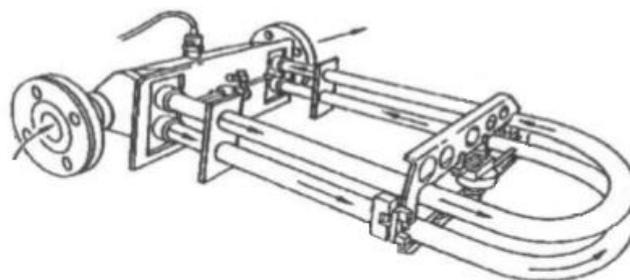


Figura 11: Medidor por efeito Coriolis [3]

Os componentes utilizados nesse modelo de medição são basicamente uma pequena tubulação secundária, com dois tubos paralelos, que é anexada à tubulação principal, e que possui geometria curva, fazendo com que ambas as extremidades daquela tubulação estejam conectadas ao tubo principal. Próximo às curvas da tubulação secundária encontram-se eletroímãs e sensores de defasagem para realizar a medição da vazão mássica.

A utilização desse tipo de medidor percorre uma gama extensa de aplicações, que vão desde a produção alimentícia, até a medição de produtos corrosivos, pois a medição não necessita de contato direto com o fluido e não perde eficiência quando aplicado a fluidos com suspensão de sólidos ou mesmo em fluidos gasosos.

O fato de ser usual em uma grande quantidade de aplicações se deve ao medidor ser facilmente instalado, insensível à viscosidade do fluido, possuir alta precisão e manter-se preciso na presença de alguma suspensão no fluido.

Esse equipamento é limitado para medições nas quais o fluido está em duas fases, ou seja, há parte líquida e parte gasosa; além da necessidade de não haver interferência na tubulação secundária, que uma vez externa à tubulação principal, se torna suscetível.

2.3.5 Termal

O funcionamento de um medidor de vazão termal se dá pelo fenômeno físico da convecção forçada ao longo da linha de fluxo, onde o fluxo provoca uma troca de calor entre o fluido e o tubo no qual o escoamento acontece, já que entre eles existe diferença de temperaturas.

Os primeiros registros de utilização de tal método para medição de vazões mássicas são atribuídos a LV King, que em 1914, comprovou por experimentação a Lei de King, na qual um fio pré-aquecido foi inserido em um canal de escoamento, onde o efeito de resfriamento que o fluido gerava no fio possibilitou a medição da vazão do fluido, e o equipamento usado em tal experimento foi denominado como anemômetro de fio quente.

Uma vez que o medidor se faz valer do fenômeno físico da transferência de calor, o procedimento de medição se dá no sensoriamento, o qual consiste numa termorresistência, que estabelece o valor de temperatura do fluido em escoamento, e num elemento aquecedor que utiliza o dado de temperatura obtido para fixar o valor da diferença de temperaturas entre o aquecedor e o fluido sempre constante.

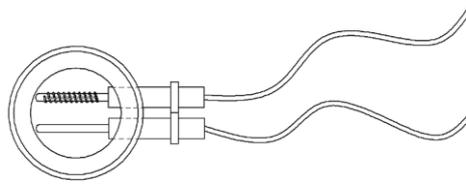


Figura 12: Medidor por termoresistências [15]

As características específicas de um medidor de vazão térmico concedem ao mesmo uma ampla gama de aplicações industriais e laboratoriais. É possível ver a utilização desse método em indústrias químicas, siderúrgicas, têxteis, petroquímicas, automobilísticas, aeronáuticas, dentre outras quase sempre para gases. Além disso, é comumente utilizado no tratamento de esgotos ou de tratamento de água. A utilização em gases corrosivos ou puros também é recorrente, como cloreto e sulfureto de hidrogênio.

O princípio utilizado pelos medidores de vazão termal possui uma série de predicados que favorecem a sua utilização, pois não possui partes móveis na composição do medidor e não depende de variações de temperatura para manter a precisão.

A medição desse equipamento possui excelentes resultados de medição, que é apresentada em números como a precisão, que é da ordem de 0,2% de fundo de escala, ou 1% da leitura, portanto, alta se comparada a outros métodos de medição de vazão.

O princípio de atuação do medidor de vazão por efeito térmico é o objeto de estudo do presente trabalho, tendo em vista sobrepujar limitações encontradas na explanação acima, onde a intrusividade do anemômetro de fio quente seja a desvantagem de maior importância para o desenvolvimento do medidor.

Capítulo 3

Descrição analítica da medição termal

O método de medição do anemômetro de fio quente, descrita anteriormente, não representa o único modelo para medição termal. Há diversas técnicas que relacionam a transferência de calor entre o fluido e outro meio sensorial e as características do movimento do fluido, para assim possibilitar o desenvolvimento de medidores de vazão por efeitos térmicos.

Utiliza-se o fundamento de medição da vazão termal, que está apresentado na Figura 13, através do funcionamento concomitante de elementos de atuação e sensoriamento térmico, agindo como elementos primários do medidor de vazão. O resultado físico térmico ocasionado pela vazão é lido termograficamente e analisado computacionalmente, para assim determinar-se a vazão.

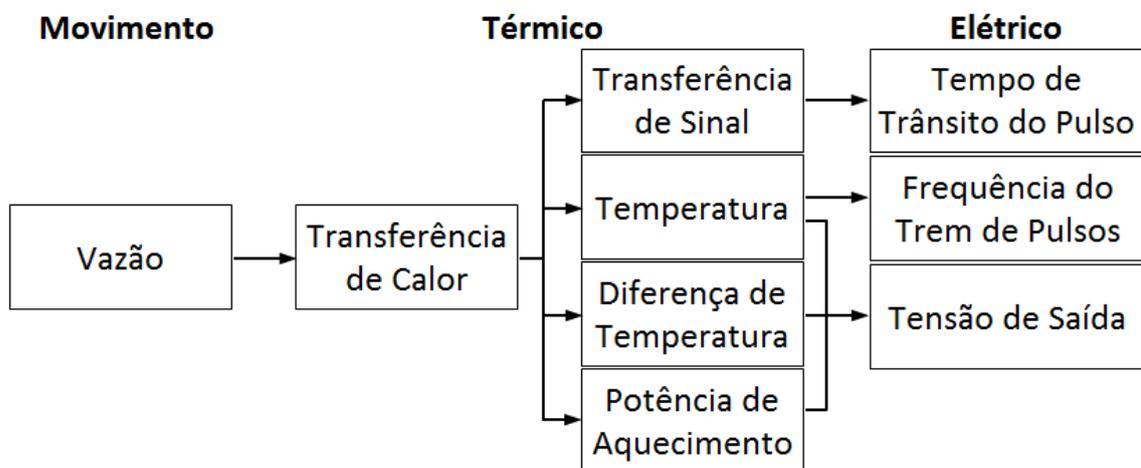


Figura 13: Fluxograma do princípio de medição [13]

Pode-se relacionar uma série de vantagens na utilização do método térmico de medição de vazão, das quais sobressaem a possibilidade de análise diretamente na parede externa do tubo, ou seja, de maneira não intrusiva. Desta forma é possível mitigar as desvantagens ocasionadas pelos distúrbios no escoamento e as perdas de velocidade e pressão, além de assegurar que, não havendo o contato de sensores de medição com o fluido, a medição está imune aos prejuízos que o contato ao fluido pode gerar à medição.

Dispondo-se de um sensor termográfico para detecção da temperatura, entende-se que é possível relacionar a distribuição de temperaturas detectada na parede do tubo com valores de vazão.

3.1 Métodos de medição de vazão termal

A medição de vazão pelo efeito termal em dutos fechados pode utilizar diferentes princípios termais que se relacionam com a vazão, cada qual dependendo da forma em que a análise é realizada, levando em conta a posição relativa entre o elemento aquecedor e o sensoramento térmico.

3.1.1 Quantidade de calor

Como detalhado qualitativamente em Capítulo anterior, o método mais utilizado na vazão por efeito térmico, é o anemômetro de fio quente, que utiliza o princípio físico da quantidade de calor obtida no processo de sensoriamento.

Esse conceito possibilita a medição da vazão mássica (\dot{m}) através da diferença da quantidade de calor (Q) que o fluido troca com o fio aquecido, onde o escoamento provoca a transferência de calor entre eles.

Um elemento aquecedor fornece calor (Q) ao escoamento e a temperatura sobre o mesmo é aferida em uma posição conhecida (T_2). Da mesma forma está sendo medida a temperatura de uma região da parede do tubo a montante do aquecedor (T_1). Permite-se então calcular a diferença de temperaturas produzida pelo efeito combinado de aquecimento e resfriamento (ΔT).

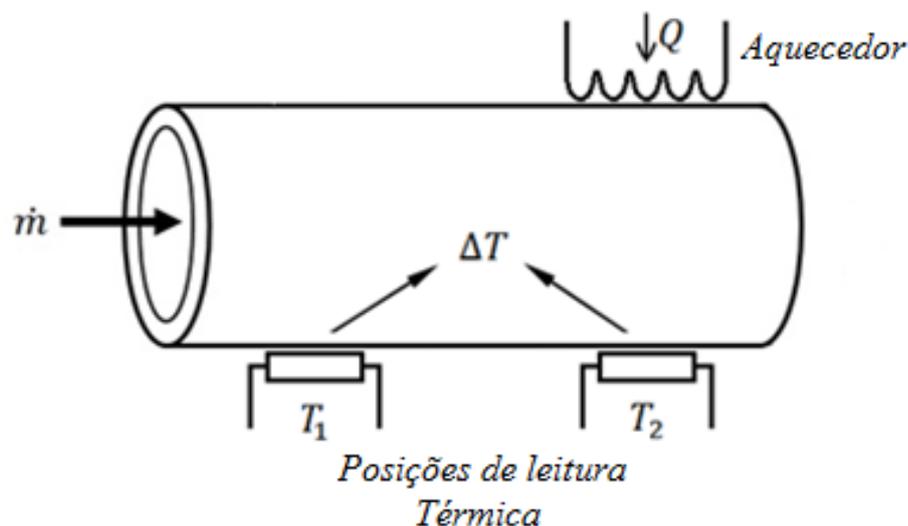


Figura 14: Representação do Anemômetro

Nesse tipo de medição, existem duas formas diferentes de processamento de medição:

- Diferença de Temperatura constante: identifica a potência demandada (Q) que faça com que a diferença de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$) seja constante em valor determinado;
- Potência constante: identifica a diferença de temperatura demandada ($\Delta T = T_2 - T_1$) que faça com que a potência (Q) seja constante em valor determinado.

3.1.2 Tempo de trânsito

Emite-se um sinal térmico (Q) por um aquecedor no escoamento e o efeito do aquecimento é transportado por uma combinação de efeitos de difusão e convecção. O tempo de trânsito do sinal de calor no interior do tubo é relacionável à velocidade do fluido.

Conhecida a distância (L_s) entre o elemento aquecedor e a posição da superfície do tubo que está sendo analisada a jusante do aquecedor, é medido o tempo (Δt) que o sinal térmico leva para chegar nessa posição (T_s). Esse tempo medido entre a emissão do sinal e a detecção se relaciona à vazão (\dot{m}), como descrito na Figura 15.

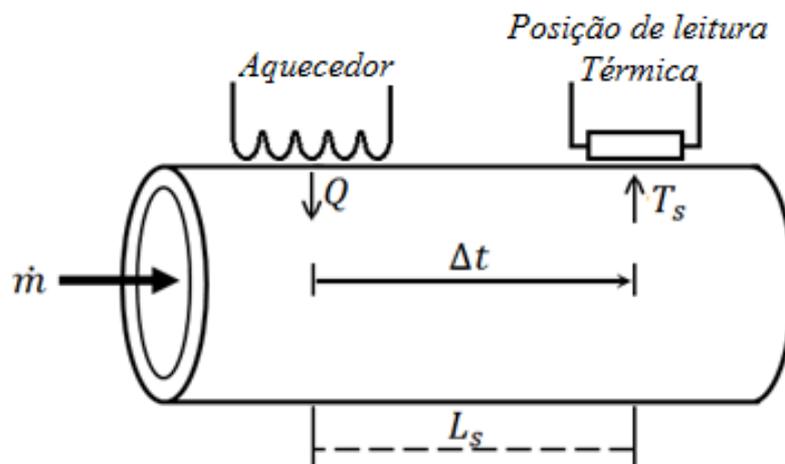


Figura 15: Representação do Tempo de trânsito

3.1.3 Oscilação térmica

Ocorre pelo controle liga-desliga no elemento aquecedor, onde a posição de leitura térmica na superfície do tubo é a mesma do elemento aquecedor. São obtidas informações térmicas através do trem de pulsos de aquecimento para assim inferir a vazão.

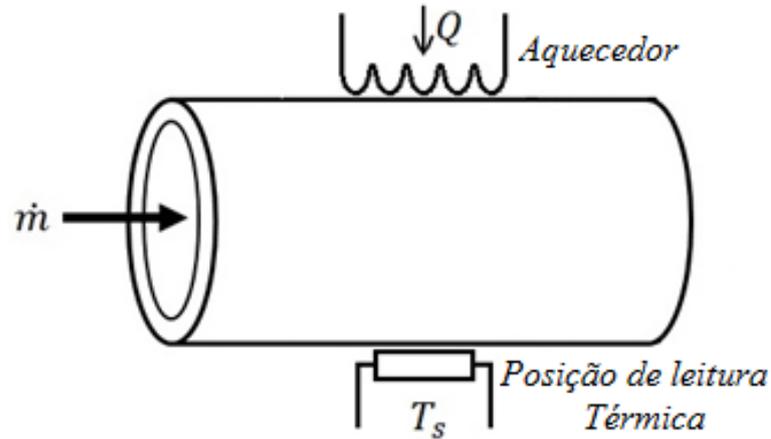


Figura 16: Representação do Anemômetro

Um sinal térmico (Q) é aplicado pelo elemento aquecedor modificando a temperatura na posição de leitura térmica (T_s), no qual é determinado o tempo (t) para que o resfriamento do aquecedor alcance uma temperatura de referência (T_{ref}) determinada. Assim que se alcança esse valor, o procedimento supracitado se repete, descrevendo um ciclo. Através desses ciclos, é possível reconhecer um padrão, onde utiliza-se a frequência (f) de repetição do procedimento para aferir a vazão mássica (\dot{m}).

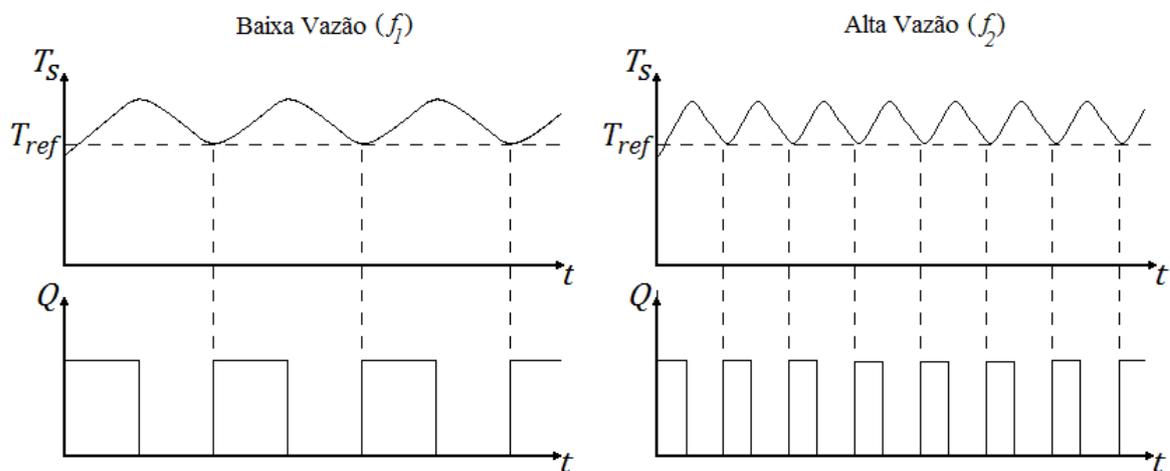


Figura 17: Gráficos gerados pelas medições

3.1.4 Calorimetria

Por ser o método empregado no presente estudo, é a partir deste processo que será baseada a análise objetiva no medidor proposto.

Conhecendo-se o material do tubo, encontra-se em seu entorno, um elemento aquecedor conduz calor pela dispersão térmica e ainda um fluido movimentando-se em contato com tal região, troca calor pelo efeito convectivo, desenvolvendo um perfil térmico nesta região.

A condução do calor fornecido pelo aquecimento (Q) no fluido, sem escoamento, e na parede do tubo resulta na distribuição espacial de temperaturas esboçada. Quando o fluido está em movimento e o aquecimento é mantido, surge o efeito convectivo, que produz a alteração da distribuição de temperatura, que se relaciona à vazão (\dot{m}).

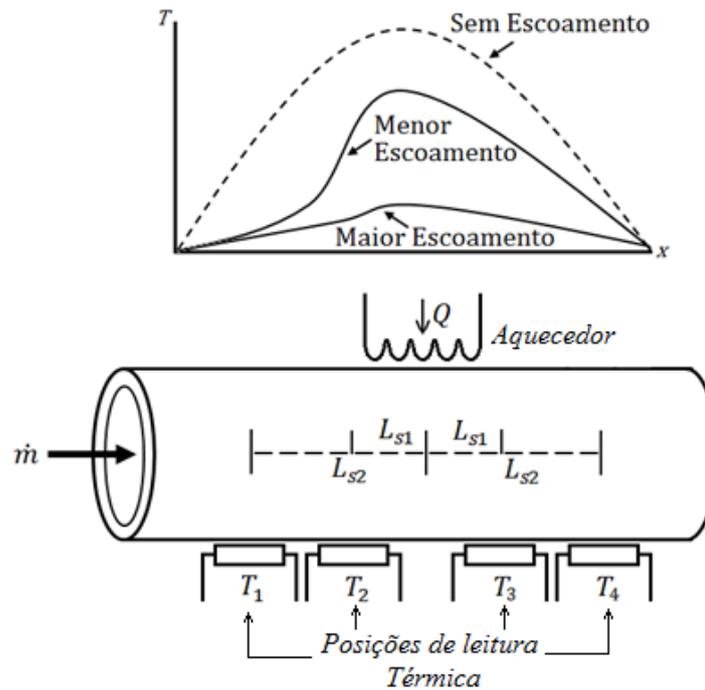


Figura 18: Perfis de temperatura de calorimetria

Para a utilização de tal princípio é realizada a montagem necessitando no mínimo de um aquecedor e dois pontos de temperatura equidistantes de par em par dispostos a jusante e o restante a montante do aquecedor.

O método termográfico pode ser incluído como análogo ao método calorimétrico, no qual é possível analisar vários pontos de temperatura, onde o elemento sensor é a projeção gráfica em representação de imagem da distribuição de temperaturas ao longo do sentido axial do tubo.

Parte-se do pressuposto de que o valor da temperatura do fluido é inferior ao do tubo depois do aquecimento, assumindo que toda a parede de tubo da superfície de controle está aquecida. As variações percebidas no perfil são provocadas partindo da extremidade do tubo na qual o fluxo é inserido, que causa resfriamento no tubo pré-aquecido, nas posições axiais anteriores ao elemento aquecedor.

Quanto mais distante da extremidade de inserção da vazão no tubo, menor é o efeito do resfriamento, já que se aproxima do elemento aquecedor posicionado na metade longitudinal do tubo.

Além do elemento aquecedor, o efeito de resfriamento não é idêntico ao efeito aquém do aquecedor, já que o fluido aquece no processo, portanto a mesma intensidade de vazão não provoca efeitos térmicos idênticos simetricamente, em relação ao elemento aquecedor.

Quanto menor for a vazão no interior do tubo, menor será a quantidade de fluido que passa pelo aquecedor, fazendo com que esse volume de fluido em escoamento tenha menor capacidade de resfriar o tubo, já que a menor quantidade de fluido será aquecida com maior facilidade.

Ao se tratar de altas vazões, há uma quantidade maior de fluido em escoamento e, portanto, tal fluido não aquece tanto, provocando em sua passagem após o elemento aquecedor um efeito de resfriamento maior, quando comparado a baixas vazões.

Para a aplicação desse método, existem duas formas de processamento para o controle de um dos parâmetros, de forma a possibilitar a medição da vazão:

- Temperatura constante: identifica a potência demandada (Q) que faça com que um ponto definido ao longo do tubo mantenha temperatura fixa (T_{ref}) e a variação térmica nos demais pontos possibilitem a determinação da vazão;
- Potência constante: concede ao sistema a potência (Q), enquanto a variação em todo o perfil térmico possibilita a determinação da vazão.

Por tal análise se espera inferir a vazão pela relação com os perfis gerados, quando fornecidos valores conhecidos de potência, tanto no caso de valores pré-determinados, quanto na situação em que se aferem valores determinados pela experimentação.

3.2 Descrição do perfil de temperaturas

A fim de determinar o Perfil Térmico gerado, torna-se necessário lançar mão de fundamentos da transferência de calor e massa, uma vez que é necessário observar a influência dos fenômenos de condução e convecção térmicas do sistema.

O procedimento realizado consistiu em submeter o sistema ao aquecimento, gerando primeiramente apenas o fenômeno da condução térmica na superfície do tubo, sendo essa primeira etapa sem a influência da vazão mássica, ou seja, $\dot{m}_{inicial} = 0$. Deve-se observar o tempo de estabilização térmica, no qual o efeito térmico do aquecedor alcança todo o tubo, não havendo mais variação térmica perceptível ao longo do tubo.

Vale frisar as direções vetoriais nas quais o calor se propaga no espaço limitado pelo tubo para facilitar a análise:

- Direção angular (θ) – Considerando o aquecimento uniforme ao redor do tubo, é plausível dizer que não há variação térmica em θ ;
- Direção radial (r) – Uma vez que a resistência térmica do ar no interior do tubo é muito maior do que a do material do próprio tubo, despreza-se a condução térmica no ar confinado no tubo e pela pequena espessura do tubo, despreza-se o efeito em toda a direção r .
- Direção axial (z) – O principal meio de propagação térmica, e que é objeto de análise deste estudo, é ao longo do tubo, onde a variação térmica produz significativo efeito, que pode ser aplicado no conceito explanado por este trabalho.

Fazendo uso da técnica de análise de transferência de calor por Incropera (2011, p. 72), realiza-se uma exemplificação análoga entre a transferência de calor unidimensional e circuitos elétricos, onde pode-se comparar as resistências térmicas e elétricas, como está representado na Figura 19.

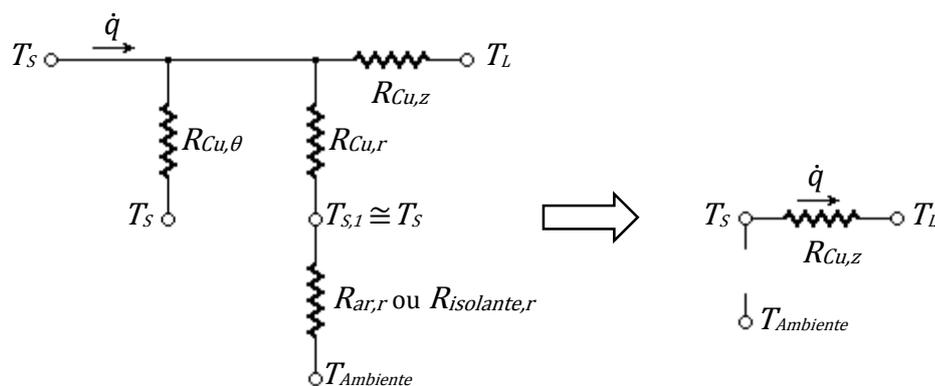


Figura 19: Representação análoga em circuitos elétricos

Onde:

T_s – Temperatura superficial;

\dot{q} – Taxa de transferência de calor;

$R_{Cu,\theta}$ - Resistência térmica do cobre na direção angular θ ;

$R_{Cu,z}$ - Resistência térmica do cobre na direção axial z ;

$R_{Cu,r}$ - Resistência térmica do cobre na direção radial r ;

$R_{ar,r}$ – Resistência térmica do ar na direção radial r ;

$R_{isolante,r}$ - Resistência térmica do isolante na direção radial r ;

$T_{Ambiente}$ – Temperatura do ambiente;

$T_{Ambiente}$ – Temperatura superficial na posição L .

No volume de controle referente ao sistema analisado, descreve-se a equação do balanço de energia.

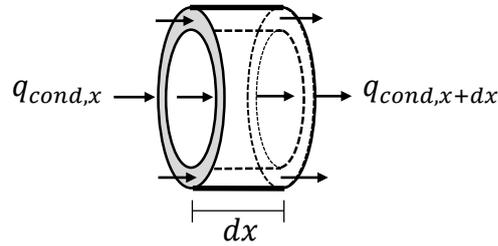


Figura 20: Representação da condução tubular

$$\begin{aligned} \dot{E}_{acumulada} &= \dot{E}_{saída} - \dot{E}_{entrada} & (1) \\ \rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} A_c dx &= q_{x+dx} - q_x \Rightarrow q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q}{\partial x} dx \\ \rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} A_c dx &= \frac{\partial q}{\partial x} dx \Rightarrow q = -k A_c \frac{\partial T_s}{\partial x} \\ \rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} A_c dx &= -k A_c \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} dx & (2) \end{aligned}$$

Onde:

$q_{cond,x}$ - Quantidade de calor de condução na posição x ;

$q_{cond,x+dx}$ - Quantidade de calor de condução na posição $x + dx$;

dx - Distância diferencial;

\dot{E} - Taxa de transferência de energia;

ρ - Massa específica;

c_p - Calor específico a pressão constante;

A_c - Área de condução;

k - Condutividade térmica;

Obtém-se então a equação da difusão do calor para condutividade constante sem geração de energia:

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = -\frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (3)$$

Em regime permanente não há variação da temperatura no tempo, tornando o segundo termo igual a zero e obtém-se como solução da equação diferencial originada um perfil representado por uma função do primeiro grau.

Quando é considerada a variação da temperatura em função do tempo, recorre-se a equação do calor da termodinâmica sem alteração de estado físico:

$$Q = m_{Cu} c_p \Delta T_s \quad (4)$$

Q – Transferência de calor;

m_{Cu} – Massa de cobre.

A variação no tempo pode ser descrita pela seguinte derivada:

$$\dot{q} = m_{Cu} c_p \frac{dT_s}{dt} \quad (5)$$

Logo,

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = - \frac{\rho c_p}{k} \frac{\dot{q}}{m_{Cu} c_p}$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{k} \frac{\dot{q}}{\rho V_{Cu}} \quad (6)$$

Onde: V_{Cu} – Volume de cobre.

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k A_s} = 0 \quad (7)$$

Solucionando a equação diferencial é obtido o resultado:

$$T_s = -ax^2 + C_1 x + C_2 \rightarrow a = \frac{\dot{q}}{2A_s k} \quad (8)$$

Onde: A_s – Área superficial.

Pela condição de Dirichlet determinam-se as constantes de integração C_1 e C_2 .

$$\begin{cases} T_s(+L) = T_L = -a(+L)^2 + C_1 L + C_2 \\ T_s(-L) = T_L = -a(-L)^2 - C_1 L + C_2 \end{cases}$$

A solução do sistema de equações descreve que $C_1 = 0$, $C_2 = aL^2 + T_L$, portanto:

$$T_s(x, \dot{q}) = -ax^2 + aL^2 + T_L \quad (9)$$

Implementando valores arbitrários às constantes da equação do perfil é possível gerar um gráfico de superfície, considerando-se a temperatura em função da posição no tubo e da potência fornecida.

A partir das observações do sistema sob o efeito exclusivo de condução térmica, deve-se analisar os efeitos combinados de condução e convecção térmica. Como descrito anteriormente, a potência (\dot{q}), oriunda do elemento aquecedor, produz o efeito da condução, enquanto a vazão mássica (\dot{m}) é gerada pelo emissor de fluxo, produzindo convecção forçada.

Ao incluir-se no estudo o efeito da convecção forçada, as avaliações são tomadas partindo do pressuposto de que não há taxas de vazamento do fluido contido no interior do tubo através de sua superfície, portanto as premissas básicas do funcionamento do método consistem em haver condução unidirecional, apenas na direção longitudinal do tubo e a convecção forçada considerada é apenas no interior do tubo.

Para a análise teórica dos efeitos físicos de transferência de calor, utilizam-se dois volumes de controle, onde (a) observa exclusivamente a parede do tubo, enquanto (b) descreve os efeitos diretamente na superfície interna do tubo, considerando o escoamento.

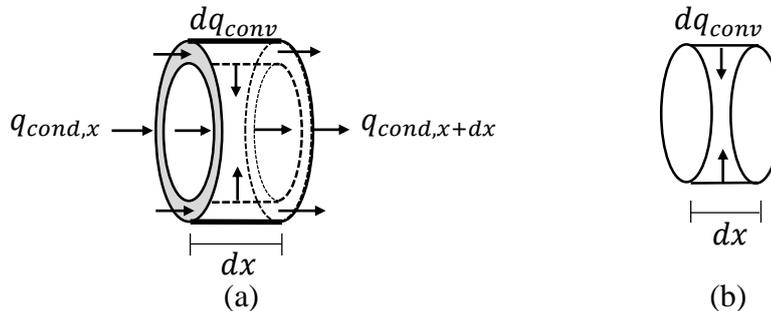


Figura 21: Efeito de condução térmica tubular

Valendo-se da Lei de conservação de energia a fim de descrever o processo, analisa-se somente o volume de controle da parede tubular, tornando possível determinar o balanço da energia, utilizando mais uma vez a Equação 1 ($\dot{E}_{acumulada} = \dot{E}_{saída} - \dot{E}_{entrada}$):

$$\rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} A_c dx = q_{x+dx} - q_x + dq_{conv} \Rightarrow q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_{cond}}{\partial x} dx$$

$$\rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} A_c dx = \frac{\partial q_{cond}}{\partial x} dx + dq_{conv} \quad (10)$$

Onde,

$$q_{cond} = -kA_c \frac{\partial T_s}{\partial x}, \quad dq_{conv} = hP_i dx (T_s - T_m) \quad e \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}}{\rho V_{Cu} c_p}$$

Logo,

$$\rho c_p \frac{\dot{q}}{\rho V_{Cu} c_p} A_c dx = -kA_c \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} dx + hP_i dx (T_s - T_m)$$

$$\frac{\dot{q}}{2LA_c k} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{hP_i}{A_c k} (T_s - T_m) \quad (11)$$

Onde:

h – Coeficiente convectivo;

P_i – Perímetro interno;

T_m – Temperatura média do fluido.

Semelhantemente obtém-se a solução da equação do balanço de energia do volume de controle, através da 1ª Lei da termodinâmica.

$$\dot{E}_{saída} = \dot{E}_{entrada} \quad (12)$$

$$\dot{m}c_{ar}T_m + \dot{m} \frac{d(c_{ar}T_m)}{dx} dx = \dot{m}c_{ar}T_m + dq_{conv}$$

$$dq_{conv} = \dot{m}c_{ar}dT_m \quad (13)$$

Uma vez que

$$dq_{conv} = hP_i dx (T_s - T_m)$$

Portanto

$$\dot{m}c_{ar}dT_m = hP_i dx (T_s - T_m)$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{hP_i}{\dot{m}c_{ar}} (T_s - T_m) \quad (14)$$

A convecção descrita na equação é proveniente da remoção do calor nas paredes do tubo em função do efeito gerado pelo fluxo, portanto a combinação das equações que descrevem os balanços de energia descritos anteriormente, produz um sistema de equações diferenciais.

$$\begin{cases} \frac{\dot{q}}{2LA_c k} = -\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{hP_i}{A_c k} (T_s - T_m) \\ \frac{dT_m}{dx} = \frac{hP_i}{\dot{m}c_{ar}} (T_s - T_m) \end{cases}$$

O sistema é resolvido com o auxílio do *software* Matlab®, onde foram obtidas várias soluções para o mesmo. Ao resolvê-lo, pode-se chegar em soluções, em funções do segundo grau e funções exponenciais, ou mesmo realizar a soma entre tais funções.

Uma vez que há um número de coeficientes a se determinar muito elevado, necessita-se realizar procedimentos matemáticos de aproximação, onde considera-se a temperatura na qual se inicia o processo de análise do efeito de convecção, a mesma que foi fornecida pelo efeito da condução após a distribuição uniforme ao longo do tubo.

$$T_S(x, \dot{q}) = -ax^2 + aL^2 + T_L$$

para $\dot{m} = 0$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{P_S}{c_p \dot{m}} h(T_S - T_m),$$

$$h = \alpha + \beta \dot{m}^\gamma$$

$$\frac{dT_m}{dx} = b(-ax^2 + aL^2 + T_L - T_m),$$

$$b = \frac{P_S}{c_p \dot{m}} h$$

Pela solução da equação diferencial é fornecido o seguinte resultado:

$$T_m(x, \dot{q}, \dot{m}) = -ax^2 + \frac{2a}{b}x - \frac{2a}{b^2} + aL^2 + C_1 e^{-bx} + T_L \quad (15)$$

Determina-se a constante de integração C_1 , novamente, pela condição de contorno de Dirichlet, já que em $x = 0$ o valor de temperatura é máximo.

$$\left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{x=0} = \left[-2ax + \frac{2a}{b} + C_1(-b)e^{-bx} \right]_{x=0} = 0$$

$$\frac{2a}{b} - bC_1 = 0$$

$$C_1 = \frac{2a}{b^2}$$

Pela equação de resfriamento de Newton é possível calcular a nova temperatura da superfície do duto, considerando o efeito da convecção:

$$\dot{q} = A_S h(T_S - T_m)$$

$$T_S = \frac{\dot{q}}{A_S h} + T_m$$

$$T_S(x, \dot{q}, \dot{m}) = -ax^2 + \frac{2a}{b}x + aL^2 + \frac{\dot{q}}{A_S h} - \frac{2a}{b^2}(1 - e^{-bx}) + T_L \quad (16)$$

Sendo os coeficientes dados por:

$$a = \frac{\dot{q}}{2A_S k},$$

$$b = \frac{P_S}{c_p \dot{m}} h$$

e

$$h = \alpha + \beta \dot{m}^\gamma$$

A análise dos efeitos térmicos aos quais o tubo se submete, onde a vazão provoca a convecção forçada partindo de uma das extremidades do tubo previamente aquecido, esboçou que a atuação do resfriamento gerado no tubo é perceptivelmente maior nos trechos próximos aos quais o fluxo é inserido do que nos trechos posteriores, como está representado na Figura 22, que mostra como o efeito acima pode ser facilmente observado.

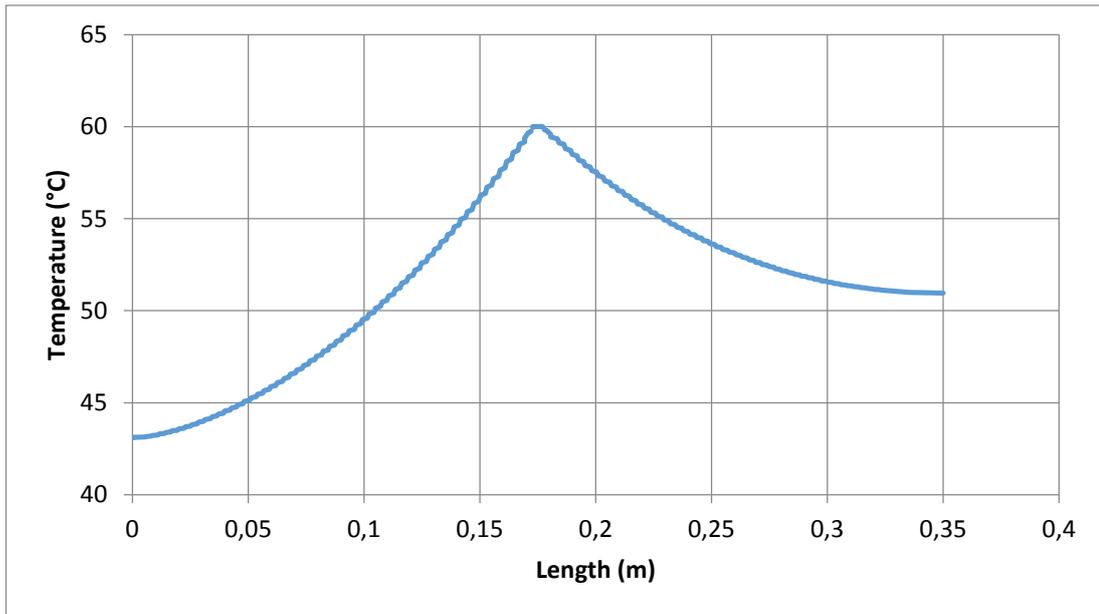


Figura 22: Gráfico de temperaturas

Capítulo 4

Experimentação

Neste trabalho desenvolve-se a simulação de todo o processo a ser analisado, desde o aquecimento do tubo de cobre a partir da resistência de Tungstênio, passando pelo escoamento de ar em regime com taxas objetivas de turbulência, até a variação da temperatura no fluido em função da transferência de calor entre o fluido em escoamento por convecção forçada e a parede tubo previamente aquecido.

Após a simulação, utilizam-se os dados obtidos para a montagem de um protótipo a fim de avaliar a discrepância dos dados obtidos na simulação, com o protótipo, de forma que a simulação sirva como referência e parâmetros de análise, além de extrair-se da simulação dados fundamentais para a melhor montagem possível do protótipo de testes.

O software de CAD utilizado para a simulação foi o Solidworks®, onde é possível realizar a modelagem sólida do sistema proposto e a simulação física do funcionamento do medidor nas condições parametrizadas. Ademais, para a obtenção de dados necessários para a análise de todo o processo, a partir de informações fornecidas ao projeto, plotagem gráfica e aplicação de métodos computacionais de controle, foi utilizado o programa Matlab®.

O propósito da análise é reconstituir o perfil de temperaturas da parede do tubo, sendo tal perfil originado pelo efeito combinado do aquecimento e do resfriamento, por parte do resistor e do escoamento, respectivamente. Desta maneira, cada perfil obtido é relacionado a um valor de vazão.

A partir da aquisição dos dados fornecidos pelos testes da simulação sólida e análise computacional, foi possível conceber um projeto real do sistema simulado, onde as dimensões utilizadas foram as melhores possíveis, de acordo com a determinação computacional, com aproximações em função das limitações comerciais dos componentes.

A concepção de um protótipo para um instrumento de medição permite a compreensão básica das aferições em ambiente controlado, permitindo a extensão do entendimento para a análise de dados na aplicação final. Desta maneira possibilita-se validar requisitos de medição (Rosário, 2009).

4.1. Componentes

Tanto no processo de simulação, quanto na montagem do protótipo real do medidor, foram utilizados determinados componentes básicos. Tais componentes serão descritos a seguir, tendo em vista que durante o processo de montagem do protótipo, alguns componentes foram substituídos por outros que apresentaram maior excelência nas características necessárias à experimentação.

4.1.1 Tubo de cobre

O canal de escoamento no qual o fluido transitará foi selecionado de forma que o material fosse disponível no mercado, buscando-se a melhor característica de condutividade térmica, que é o centro da proposta desse modelo de medição.

O material no trecho de medição térmica da tubulação é de cobre puro, por apresentar excelente condutividade térmica do material, conforme Incropera (2014 p. 624 e 625): $k_{Cu} \cong 400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. O modelo projetado na simulação sólida está representado na Figura 23 e segue as especificações físicas e geométricas do tubo utilizado no protótipo.

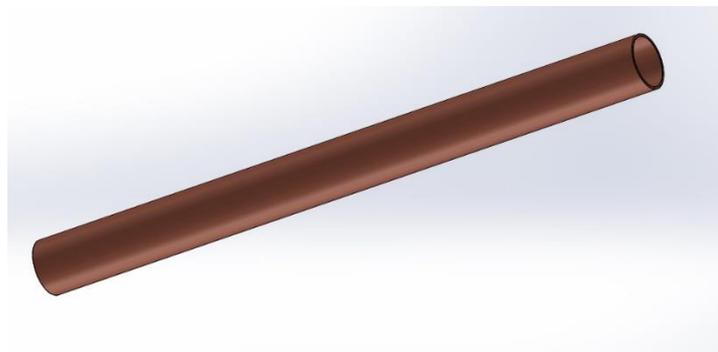


Figura 23: Tubo de cobre para simulação

Além da condutividade térmica, o tubo rígido de cobre também apresenta alto módulo de rigidez e excelente módulo de elasticidade, uma vez que o protótipo deve ser resistente a intemperes naturais, pelo fato de ficar exposto.

O catálogo de produtos da empresa Paranapanema®, descreve tais valores e está apresentado no Anexo A, onde destaca-se os principais valores de propriedades físicas: $G = 4500 \text{ kg/mm}^2$ e $E = 12000 \text{ kg/mm}^2$.

4.1.2 Filamento resistivo de Tungstênio

Para provocar o aquecimento ao tubo, foi selecionado um filamento de Tungstênio, comumente utilizado para aquecimentos em geral. O fio resistivo recebe a corrente elétrica

fornecida por uma fonte externa, que ao ser percorrido pela mesma, resiste à passagem da corrente, gerando assim um aquecimento uniforme ao longo do comprimento do fio.

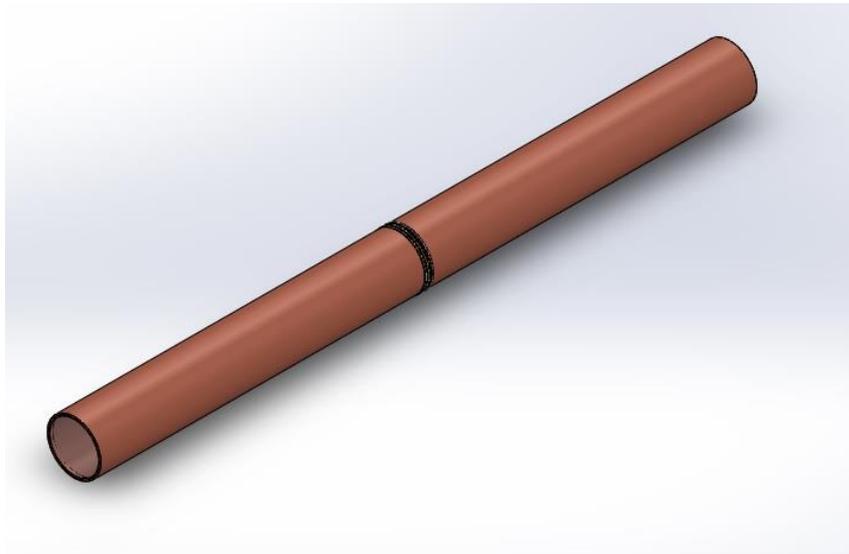


Figura 24: Representação do fio resistivo posicionado no tubo de simulação

O Tungstênio foi selecionado por apresentar alta resistividade à condução da corrente elétrica, favorecendo assim o aquecimento. A resistividade do Tungstênio, segundo Giancoli (1995), é $\rho_T = 5,6 \times 10^{-8} \Omega m$, além da coeficiente de temperatura $\alpha = 0,004^\circ C^{-1}$.

4.1.3 Emissor de fluxo

O projeto propõe a medição da vazão de ar ao longo de um trecho tubular, portanto o fluxo de ar que percorre tal tubulação é a parte central do projeto e faz-se necessário montar um emissor de fluxo de ar no sistema.

Para essa tarefa, foi escolhido um *cooler* de alto fluxo, que é capaz de movimentar uma massa de ar suficiente para ser medida no modelo proposto pelo projeto, embora a própria proposta preveja um protótipo compacto, móvel e desmontável, características essas que limitam as dimensões geométricas de todas as partes. O elemento emissor de fluxo estudado na simulação foi projetado seguindo especificações do modelo real aplicado no protótipo.

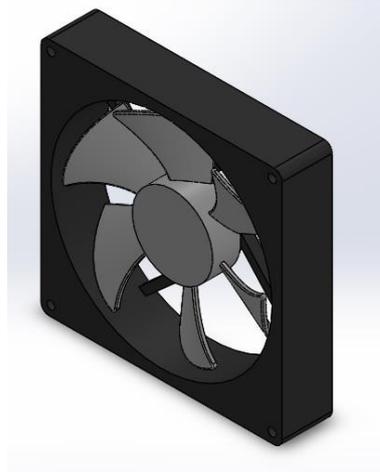


Figura 25: Modelo sólido do *cooler*

As especificações do *cooler* determinam o valor de fluxo de ar máximo de $\dot{m} = 132,523 \text{ m}^3/\text{h}$, que representa baixa vazão, que é tema e dado de projeto para o experimento a ser realizado e aferido.

4.2 Simulação

Uma montagem com os componentes supracitados foi simulada, com todas as nuances quantas fossem possíveis para tornar a simulação fidedigna à realidade, com o intuito de testar dimensões possíveis do protótipo e as melhores condições de montagem e adequação dos componentes.

Ao realizar tal procedimento, espera-se obter resultados diferentes dos reais obtidos pela análise do protótipo, por não ser possível constar na simulação do processo todas as variáveis naturais que circundam um protótipo real.

Para tal, a simulação visa estabelecer melhores condições de trabalho do protótipo e otimizar as dimensões geométricas e realizar testes com maior facilidade, o que diminui os custos e o tempo de elaboração, como está representado na Figura 26.

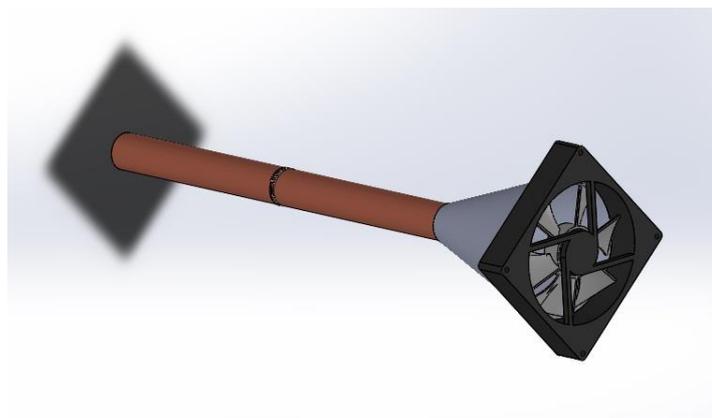


Figura 26: Sistema usado na simulação

Na simulação é extrudado um tubo de cobre conforme as especificações de tubos comerciais, ressaltando o diâmetro nominal de projeto, no qual estará localizado o filamento resistivo de tungstênio, o qual obedecerá às características macro geométricas do componente real, o qual envolverá o tubo com espaçamento e quantidade de voltas determinado de forma que a resistência elétrica forneça potência de 20W, que por sua vez gera temperatura média de 60°C, que é temperatura suficiente para que seja provocado o efeito térmico necessário, testado na simulação.

Nessa etapa de testes, são obtidos resultados preliminares que podem ser comparados com os resultados reais tomados da análise do funcionamento do protótipo, a fim de ajudar na calibração do sistema, além de presumir os resultados esperados. Tais resultados serão expostos em texto posterior.

4.3 Protótipo

A fim de experimentar a proposta do projeto em situação fisicamente real, foi elaborada a montagem de um protótipo com os dados obtidos na simulação, atendendo-se às limitações comerciais, e que as características dos componentes existentes devessem atender às especificações de projeto.

4.3.1 Placa de aquisição de dados

Todo o processo de acionamento e sensoriamento necessários para realizar os testes no protótipo devem ser controlados, para assegurar que os valores estipulados pelo projeto sejam efetivamente aplicados ao sistema.

Adquiriu-se, portanto uma placa de aquisição de dados, que também funciona concomitantemente como um elemento de controle de instrumentação, chamada Arduino®, que se conecta a um computador para que seja possível monitorar os valores dos resultados obtidos e impor os valores de projeto a todos os componentes do sistema de medição.

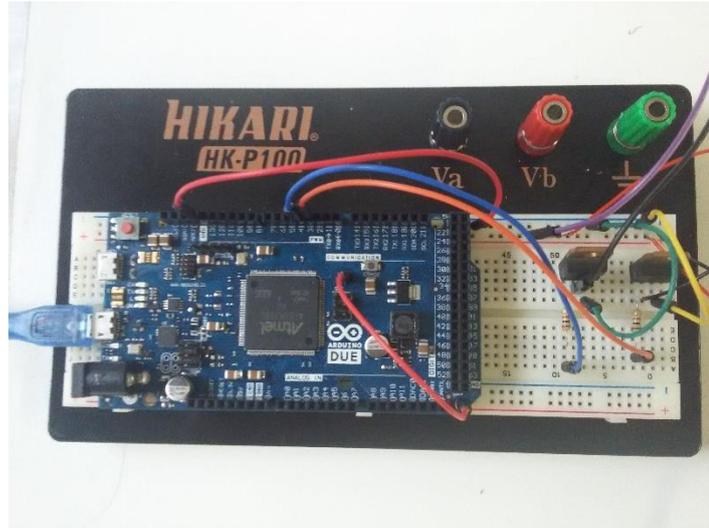


Figura 27: Placa de aquisição de dados

Dentre os Arduinos disponíveis no mercado, foi selecionado o Arduino Due, que possui maior gama de controle e maior quantidade de portas digitais.

4.3.2 Fonte de alimentação

Uma vez que o sistema funciona por acionamento eletrônico, faz-se necessário fornecer corrente elétrica com valor estipulado para cada componente.

Com esse objetivo, usou-se uma fonte de alimentação em corrente contínua de 12V, gerando corrente máxima de 5A, o que resulta numa potência total máxima de 60W para alimentação de todo o sistema.



Figura 28: Fonte de alimentação

O Arduino não é conectado à fonte, uma vez que pode ser alimentado apenas pela conexão USB com o próprio computador.

4.3.3 Tubo de cobre

Para tal, adquiriu-se um tubo de cobre com 35 mm de diâmetro, que atende à exigência de projeto de possuir pequeno diâmetro, com 400 mm de comprimento, que foi o mínimo estabelecido pela simulação para que houvesse a melhor resolução possível para haver a melhor leitura térmica possível de acordo com os dados impostos pelo projeto.



Figura 29: Tubo de cobre

O tubo deve ser isolado fisicamente de contato com outros meios dissipadores de calor para que não haja transferência indesejada de calor para outro meio sólido por condução térmica.

4.3.4 Filamento resistivo

Para o aquecimento, foi adquirido um filamento de tungstênio da marca GE® visando o aquecimento do tubo de cobre. Para tal, o fio de tungstênio foi ligado à alimentação da fonte, de forma que houvesse passagem de corrente elétrica por ele.

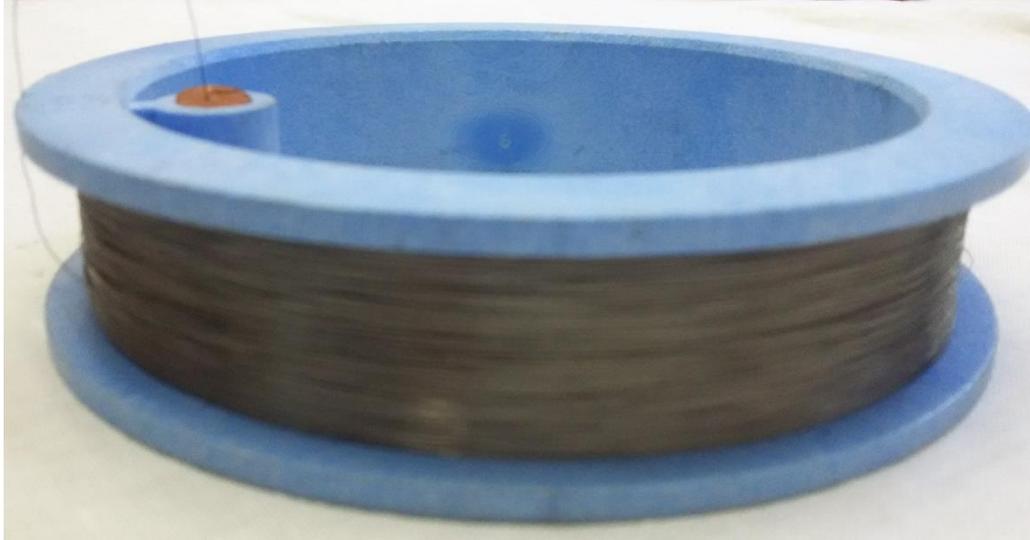


Figura 30: Filamento de tungstênio

Para o controle da corrente elétrica e, portanto, da temperatura dissipada pelo filamento, um transistor TIP122 (Anexo C) foi colocado entre a fonte e o fio resistivo, sendo controlado pelo Arduino. Portanto a temperatura no fio é controlada pela placa de aquisição de dados através do transistor e medida em tempo real, concomitantemente por um sensor térmico de precisão LM35 (Anexo D), também ligado à placa de aquisição de dados.

4.3.5 Emissor de fluxo

O emissor de fluxo de ar escolhido foi o *cooler* da *Thermaltake® Cooler FAN DuraMax AF0060*, que possui vazão máxima de 269,5 m³/h. Tendo em vista as perdas antes da entrada no tubo, objetivou-se alcançar valores mínimos de 90 m³/h no interior do tubo.



Figura 31: Emissor de fluxo de ar

Assim como o filamento resistivo, o emissor de fluxo está ligado à placa de aquisição de dados, a fim de possibilitar monitoramento em tempo real da rotação da hélice, além de controlar a sua velocidade para, portanto, realizar os testes com diferentes valores de vazão no interior do tubo.

4.3.6 Procedimento

Após a montagem de toda a bancada de testes, as adaptações foram realizadas de forma a obter-se a melhor formulação de resultados possível, de forma que seja possível verificar os dados pertinentes à análise de forma amplamente satisfatória.



Figura 32: Protótipo montado

O funcionamento do procedimento consiste de algumas etapas bem definidas, que possibilitam a execução do processo e sua medição, a saber:

- 1) Conexão da fonte 12VDC à linha de energia 117VAC;
- 2) Alimentação da fonte ao *Cooler* e ao fio resistivo;
- 3) Conexão dos sensores, *cooler* e fio resistivo ao Arduino;
- 4) Acionamento do fluxo de ar;
- 5) Sensoriamento e medição do calor dissipado pelo fio resistivo;
- 6) Controle da intensidade do fluxo e potência dissipada pelo fio resistivo; e
- 7) Análise termográfica da distribuição de temperaturas pelo tubo.

4.4 Dimensionamento

A montagem do protótipo deve obedecer determinados parâmetros geométricos que contemplem a maior eficiência possível, levando em conta as limitações de disponibilidade de mercado e principalmente os dados e parâmetros iniciais de projeto.

O dimensionamento neste projeto contemplará apenas o corpo do medidor, não visando, portanto, os componentes periféricos, tais como os elementos eletrônicos de controle, suportes mecânicos e derivados elétricos.

Para calcular o dimensionamento do projeto do medidor, partiu-se das dimensões básicas dos componentes primordiais, que no caso, é apenas o emissor de fluxo de ar. Uma vez que ele se faz necessário por suas características elétricas, eletrônicas e de instrumentação para a realização dos testes propostos por este projeto, as propriedades geométricas do *cooler* serviram de parâmetro inicial.

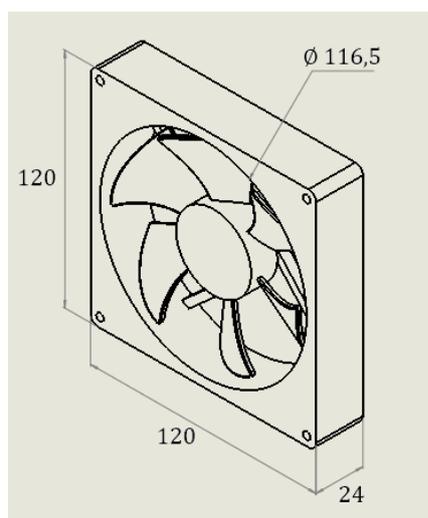


Figura 33: Representação das medidas do emissor de fluxo

Como o projeto visa atender instalações de tubulações de pequenos diâmetros, sabe-se que o diâmetro nominal de emissão de fluxo de ar é muito maior do que o diâmetro nominal do tubo empregado. Foram realizados cálculos de formatação geométrica para realizar tal adaptação.

A American Society of Mechanical Engineers (ASME, 1959, p. 203) determina parâmetros para a confecção de tubos Venturi, que neste trabalho será adaptado para elaborar um redutor de diâmetros em tubulações.

Baseada na supracitada norma, a NBR ISO 5167-1 descreve valores e relações no projeto de tais tubulações, portanto foi confeccionado um adaptador de diâmetros seguindo os preceitos determinados nessa norma.

De acordo com a descrição analítica desenvolvida em capítulo anterior deste trabalho, concluiu-se que o diâmetro nominal do tubo analisado deve ser o menor possível, gerando uma menor espessura de parede de tubo e assim favorecendo a transferência de calor entre o elemento aquecedor e o tubo.

Segundo a norma, a razão entre os diâmetros menor e maior do redutor de diâmetros deve ser, no mínimo, no valor de $\beta = 0,3$, que será o valor adotado, visto que atende à especificação de ser o menor possível.

$$\frac{d}{D} = \beta \geq 0,3 \quad (17)$$

Partindo-se do valor pré-fixado do diâmetro nominal do emissor de fluxo (D), tem-se por medição convencional que $D = 116,5 \text{ mm}$, portanto:

$$d = \beta \times D \Rightarrow d = 0,3 \times 116,5$$

$$d = 34,95 \text{ mm}$$

A medida d fornece o valor do diâmetro menor do adaptador de redução, portanto será o valor de projeto do diâmetro do tubo de cobre utilizado.

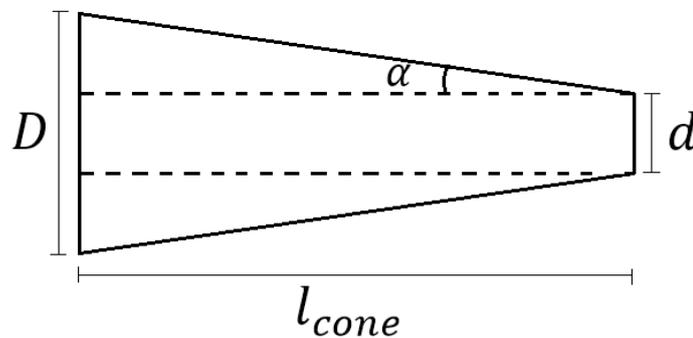


Figura 34: Medidas geométricas do cone de redução de diâmetro

Para especificação da angulação do tronco de cone, utilizou-se a mesma norma, que prevê um ângulo de $\alpha = 10,5^\circ \pm 1^\circ$.

Tal especificação conduz à seguinte relação:

$$l_{cone} = \frac{(D/2) - (d/2)}{tg\alpha} \quad (18)$$

Portanto:

$$l_{cone} = \frac{(116,5/2) - (34,95/2)}{tg(10,5^\circ)}$$

$$l_{cone} = 220 \text{ mm}$$

Tendo em mãos todas as medidas acima descritas devidamente dimensionadas, torna-se possível projetar o corpo do medidor com dimensões determinadas por cálculos normatizados e contemplando as relações micro geométricas dos componentes, como está representado na Figura 35.

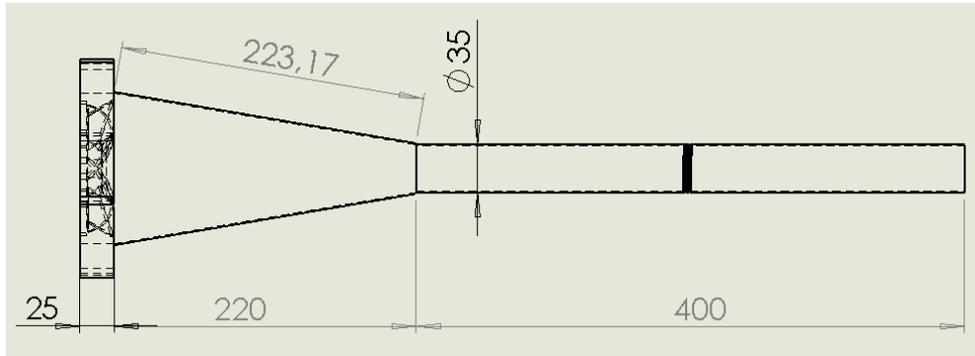


Figura 35: Esquema das medidas do corpo do medidor dimensionado

Capítulo 5

Análise dos resultados

Os resultados obtidos pelos métodos e procedimentos que foram detalhadamente descritos em Capítulo anterior deste trabalho devem ser adequados às condições impostas, para possibilitar a determinação dos valores de vazão. A emissão do ar é monitorada e controlada pelos instrumentos de comando e controle também descritos em Capítulo anterior.

A experimentação se deu em condições que o tubo em questão, de dimensões determinadas e conhecidas, fosse primeiramente aquecido até que se alcançasse a temperatura de estabilização, quando então foi ligado o fluxo, de forma que provocou um resfriamento ao longo do tubo, gerando assim um perfil de temperaturas ao longo da superfície do tubo, que será o objeto de análise deste Capítulo.

Os resultados gerados consistem basicamente em levantar informações através de tabelas e gráficos sobre o comportamento térmico dos efeitos de aquecimento provocado pelo filamento resistivo de tungstênio, combinado com o resfriamento oriundo da emissão de fluxo de ar controlada pelo sistema de controle descrito anteriormente.

5.1 Monitoramento de valores

O primeiro procedimento empírico realizado é a adequação dos valores que serão controlados pelo sistema proposto anteriormente. Para a realização do monitoramento e controle, foi desenvolvido uma programação eletrônica de instrumentação, apresentada no Apêndice A.

O código do programa recebe a medição dos valores térmicos do fornecimento de temperatura ao tubo, controla tal fornecimento, além da velocidade de rotação do emissor de fluxo, variando de forma programada os valores de vazão a serem analisados.

5.1.1 Fornecimento de calor

Os valores de concessão de calor do fio resistivo ao tubo são monitorados em tempo real pelo sensor térmico de precisão LM35, descrito no Anexo D, que por sua vez encontra-se conectado à placa de aquisição de dados.

O código de monitoramento e controle desenvolvido prevê que o aquecimento do tubo atinja valores de 50°C, sendo necessária a manutenção de tal valor com faixas aceitáveis de variação, como descrito na Equação 5.

O sistema de controle recebe os valores de monitoramento e processa o sinal enviado de forma que quando o valor da temperatura medida no fio resistivo encontra-se acima do valor máximo da faixa de temperaturas estipulado, o sistema interrompe a alimentação elétrica, gerando a interrupção do fornecimento de calor; e quando o sensor medir valores abaixo do valor mínimo da faixa de temperaturas estipulado, a alimentação elétrica é restabelecida, garantindo a manutenção do fornecimento de calor na faixa estabelecida.

5.1.2 Emissão de fluxo de ar

O mesmo programa supracitado garante o monitoramento e controle do elemento emissor de fluxo utilizado no sistema, de forma que seja possível emitir diferentes valores de vazão mássica de ar, uma vez que a rotação do *cooler* seja controlada pelo programa elaborado por meio da placa de aquisição de dados.

O controle é feito através do fornecimento de corrente elétrica ao elemento, que é realizado estipulando valores ao programa de processamento analógico entre 0 (*cooler* desligado) e 255 (*cooler* em rotação máxima) e os valores relacionados estão apresentados sucintamente na Tabela 1 e na Figura 36.

Tabela 1: Relação entre valores do código e valores de vazão

	m^3/h	13	201	30	227,5	150	262,5
1	*	14	202	32	229	200	269,5
2	*	15	203	35	231	255	269,5
3	*	16	204,5	38	233,5		
4	98	17	206	40	238		
5	108,5	18	209,5	45	240,5		
6	133	19	211,5	50	245		
7	150,5	20	213,5	55	248,5		
8	164,5	21	216	60	252		
9	182	22	218,5	75	254		
10	196	23	221	100	255,5		
11	197,5	24	223	112	256,5		
12	199	25	225,5	125	259		

*Valores incapazes de acionar o fluxo

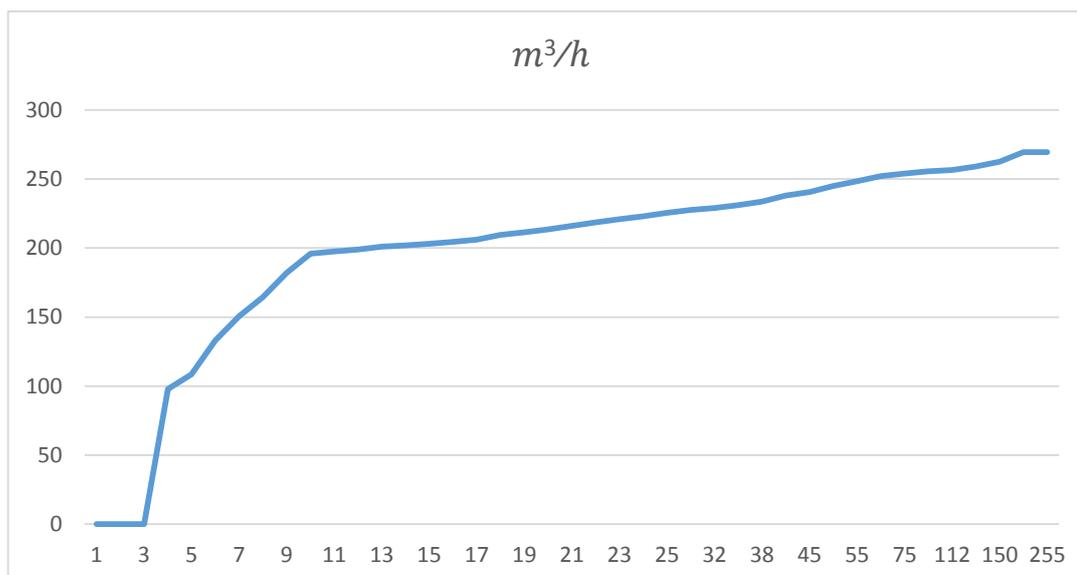


Figura 36: Gráfico de variação dos valores de vazão

A Figura e a Tabela acima, onde estão apresentados os valores de vazão relativos aos valores analógicos concedidos pela placa de aquisição de dados, explicitam o ponto de saturação nos valores entre 200 e 255, entre os quais não há resquício de variação dos valores de vazão associados.

5.2 Aquisição de resultados

A ferramenta principal de aquisição dos resultados que descreveram os valores medidos pelo sistema é uma câmera termográfica, que possibilita uma leitura com excelente precisão e produz as imagens que descrevem a distribuição transiente de temperaturas ao longo da superfície do tubo, que será posteriormente processada de forma que seja possível estabelecer uma variação de temperaturas ao longo do tubo em função do tempo.

A fim de referenciar as temperaturas medidas no sistema, aumentando assim a confiabilidade e diminuindo a faixa de erro do processo de medição, foram posicionados cinco sensores de temperatura LM35 ao longo do tubo, sendo o central com o intuito de possibilitar o controle da intensidade do aquecimento pelo filamento, como descrito em seção anterior. Os outros quatro sensores foram distribuídos com o mesmo afastamento ao longo do tubo para tal referência.

5.2.1 Câmera termográfica

O equipamento utilizado para a aquisição de imagens térmicas que foram analisadas foi a Câmera termográfica FLIR® A320, a qual está especificada com detalhes no Anexo E.

Os testes foram realizados no Laboratório do Comportamento Termomecânico dos Materiais (LACTM) no Campus do Maracanã do CEFET/RJ, o qual dispõe da tal câmera utilizada. O protótipo foi posicionado para leitura termográfica, de acordo com a Figura 37.



Figura 37: Bancada de testes termográficos

Tal equipamento permite uma análise por imagens que caracteriza a distribuição térmica em um corpo, concedendo resultados por um espectro de cores.

Nos exames iniciais utilizando a câmera termográfica, foi possível identificar um problema no sensoriamento, pois percebeu-se que o *range* de temperaturas medidas é ajustado automaticamente, e a imagem obtida mostrava quase unicamente as variações térmicas no filamento e não no tubo, como mostrado na Figura 38.

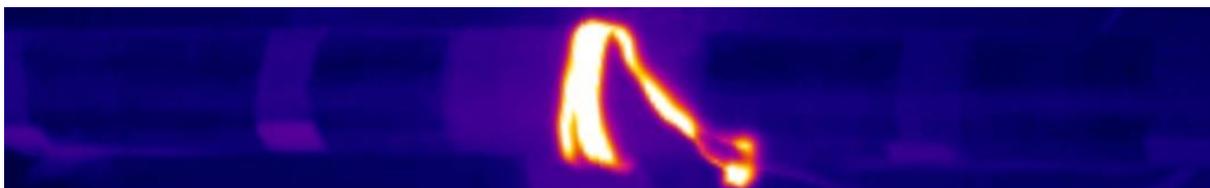


Figura 38: Imagem com *range* térmico desajustado

Tal deficiência de medição foi corrigida apenas posicionando um obstáculo opaco que impedisse a leitura no trecho no qual o filamento está presente, otimizando significativamente a sensibilidade da medição ao longo do tubo.

Espera-se que os resultados obtidos estejam relacionados aos valores de vazão concedidos pelo sistema de monitoramento e controle, tal qual foi especificado em seção anterior, de forma que o espectro gráfico de cores fornecido pela câmera, como é exemplificado pela imagem obtida pela câmera supracitada, apresentada na Figura 39.



Figura 39: Imagem de distribuição térmica inicial

O processo transiente foi analisado durante os intervalos de tempo chamados “tempo de estabilização térmica”, que consiste na duração necessária para que o regime térmico se torne permanente, ou que as variações sejam desprezíveis.

Vale ressaltar que a câmera avalia a quantidade de pontos que lhe for estipulado, o que torna maior a sua eficiência para a análise do protótipo.



Figura 40: Imagem da distribuição térmica final

A vazão provocará uma assimetria do perfil térmico em relação ao ponto médio do tubo, no qual está localizado o fio resistivo que concede calor ao sistema analisado, de maneira que tal assimetria seja avaliada em parâmetros que serão estabelecidos em seções a diante.

5.3 Processamento de resultados

A fim de finalmente traduzir os dados de temperatura obtidos através dos procedimentos detalhadamente descritos acima, faz-se necessário utilizar métodos que possibilitem tal associação entre parâmetros.

Para tal há alguns métodos estatísticos que relacionam dois ou mais parâmetros. A realização do processamento por esses parâmetros, demanda a análise o comportamento do perfil térmico, ou seja, a determinação se a tendência de crescimento ou decréscimo é conjunta ou contrária entre as variáveis.

A utilização do Modelo de Regressão Linear (MRL) possui grande potencialidade em estimar o comportamento citado, já que segundo Naghettini (2007) um MRL simples considera uma variável independente e uma variável dependente de acordo com a função

$$y = \alpha x + \beta + \varepsilon, \quad (19)$$

sabendo-se que α e β são os coeficientes do modelo, ε representa os resíduos da regressão, enquanto x é a variável independente e y a variável dependente.

A determinação dos coeficientes angular e linear se dão através de relações entre os somatórios, descrita por Paternelli (2003):

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \alpha \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - \alpha \bar{x} \quad (21)$$

Onde:

\bar{y} e \bar{x} representam os valores médios das variáveis do contexto.

Em modelagem experimental, ε representa a diferença entre o valor medido e o valor calculado, ou seja, a quantificação do erro relativo.

Na aplicação em análises com maior quantidade de variáveis dependentes, o MRL simples pode ser generalizado, de forma que seja possível modelar equações com dois ou mais coeficientes angulares, embora isso acarrete uma maior demanda computacional para a solução.

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_n x_n + \beta + \varepsilon \quad (22)$$

Para a definição dos parâmetros empregados no MRL em x_n e y_n , o algoritmo mais eficiente é o método dos mínimos quadrados (MMQ), onde busca-se minimizar o somatório dos erros quadráticos, que são a representação matemática dos resíduos gerados pelo MRL, como é exposto na Figura 40.

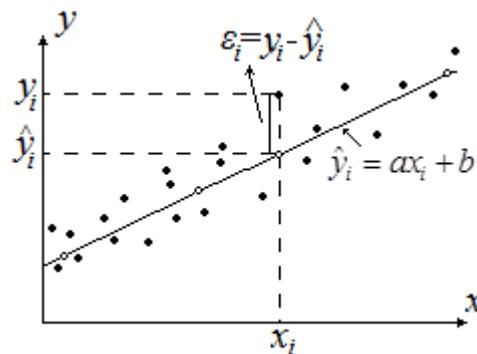


Figura 41: Gráfico comparativo entre valores medidos e calculados

A tendência de variação citada é a correlação e não evidencia relações causais entre as variáveis, mas apenas o conhecimento do processo comprova relação funcional entre as mesmas. Admite-se a análise da relação funcional pela técnica estatística de regressão, para investigação e modelagem de equações que representem a função entre variáveis dependentes e variáveis independentes (Naghetini, 2007).

Os modelos de regressão linear são definidos de acordo com a equação:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

De acordo com as características da função (f), seja linear ou não linear, estima-se o modelo de regressão que apresente a melhor relação das variáveis. Uma vez que é viável estimar a forma do modelo de regressão, é possível delimitar a análise à estimação dos parâmetros através de técnicas estatísticas supracitadas.

Grande parte de tal relação pode ser descrita através da regressão, contudo em função da variação residual inevitável, parte de tal variação permanece sem descrição, sendo necessária a quantificação de tal relação pelo coeficiente de determinação (R^2), que é definido pela razão entre a soma dos erros quadráticos gerados pela regressão e a soma dos erros quadráticos totais.

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (23)$$

Tal coeficiente significa a proporção da variância de y , contida no MRL, variando entre 0 e 1, sendo o valor mais próximo a 1 a melhor proporção de relação.

Portanto baseando-se no estudo teórico do medidor, explora-se os possíveis modelos de regressão para inferir a vazão através das variáveis de características dos perfis térmicos de maneira a obter erro mínimo e máximo coeficiente de determinação.

Em Capítulo anterior foram definidos os métodos e procedimentos para a obtenção de informações do sistema de medição desenvolvido neste trabalho. Foram descritos também métodos de análise de tais dados obtidos experimentalmente, sendo tais métodos comparados para melhor eficiência entre eles.

O processo de determinação da vazão é dividido em duas partes: A aquisição de dados por um procedimento experimental; e as estratégias de regressão e ajuste da vazão.

A partir das imagens termográficas obtidas, torna-se possível determinar representações gráficas que descrevam como diferentes valores de vazão se comportam numa relação entre a distribuição de temperaturas e a posição longitudinal no tubo.

Para tal análise utilizou-se o método de processamento computacional de imagens, através do programa MATLAB®, onde é possível traduzir informações da imagem em dados de projeto da distribuição das temperaturas ao longo da superfície do tubo.

Tais dados apresentados na Figura 42 mostram tal comportamento, sendo possível avaliar as nuances diferenciais entre cada intensidade de vazão.

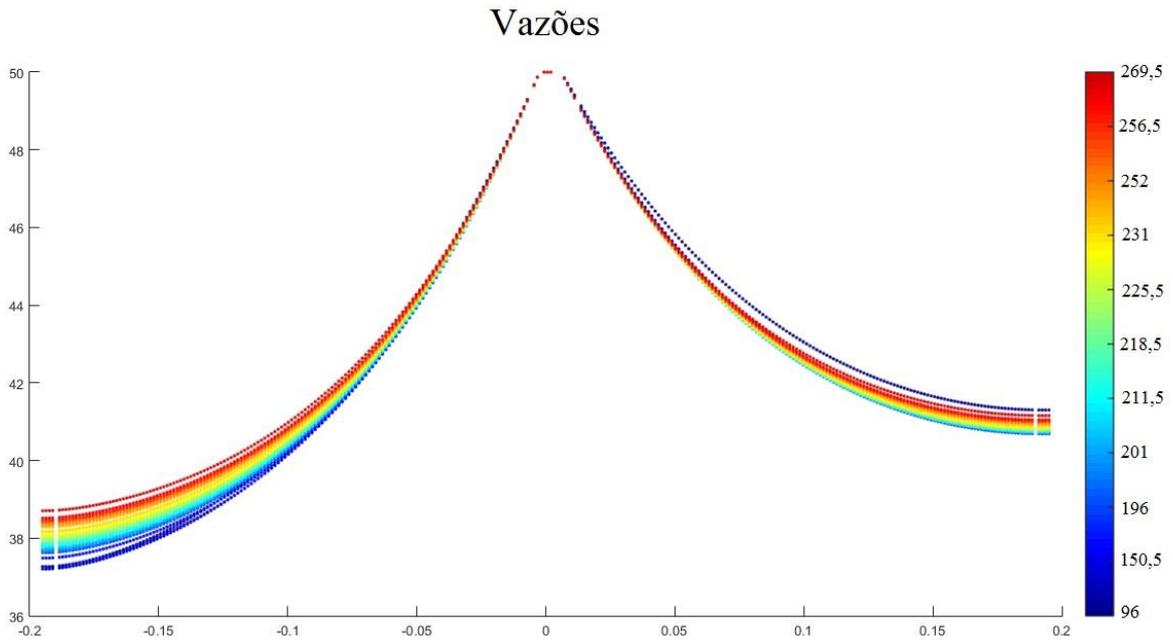


Figura 42: Gráfico de valores de vazão

As temperaturas medidas pela câmera passam por pré-processamento de imagens, de acordo com as propostas de medição termográficas, perfazendo assim um conjunto de dados de 292 pontos de temperatura ao longo do tubo, sendo 146 pontos de cada lado do elemento aquecedor, sem associação entre si contendo características do perfil de temperaturas, como é representado na Figura 43.

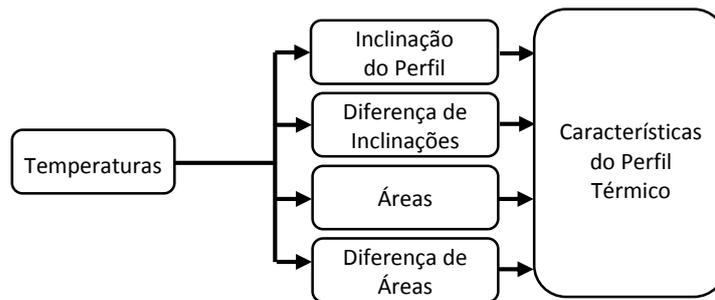


Figura 43: Diagrama de blocos do processo de inferência da vazão

Através da avaliação realizada dos perfis das temperaturas, constata-se que os valores de dados referentes às características do perfil obtido contêm relação matemática com a vazão. Para tal utiliza-se os métodos de regressão, levando em conta que os valores da vazão são aferidos diretamente pela regressão linear, como representado no fluxograma da Figura 44.

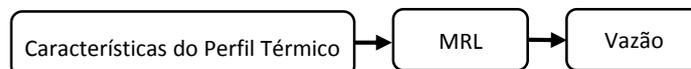


Figura 44: Aplicação das estratégias de regressão e ajuste

A massa de dados composta pelas medições realizadas é dividida em treinamento e teste com objetivo de determinação dos parâmetros de regressão e análise da capacidade de generalização do modelo. Os dados utilizados para treinamento são responsáveis pela definição dos pesos do MRL. A existência do conjunto de testes permite determinar a capacidade de generalização dos modelos, pois não se utilizou as informações deste conjunto para a definição do modelo. (Quirino, 2015)

A distribuição das temperaturas medidas foi de acordo com a análise de temperaturas oriundas da imagem termográfica, como pode-se ver na Figura 45.

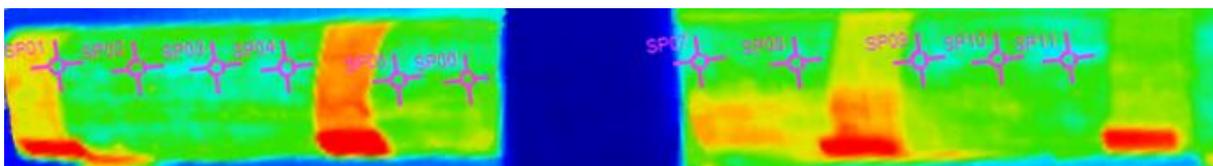


Figura 45: Análise de pontos de teste ao longo do tubo

Para o presente estudo, a segregação dos dados foi feita aleatoriamente, de forma que as medições da massa de dados sejam usadas para treinamento dos modelos, 37 medições são inseridas no grupo de validação e 11 medições consistem no grupo de testes.

Ao aplicar os dados adquiridos de cada característica do perfil no modelo linear, obtém-se resultados através de vários métodos possíveis, os quais podem ser comparados a fim de determinar-se qual o método que descreve o menor erro de medição.

5.3.1 Determinação das características do perfil

A proposta deste trabalho visa a análise da disposição térmica na superfície de um tubo, logo se baseando no fato da termografia relacionar os perfis de temperatura aos diferentes valores de vazão.

A consideração inicial é que para diferentes vazões existe simetria no perfil de temperaturas ao longo do tubo, em relação ao resistor que se encontra na metade do comprimento do tubo.

Apropria-se de características do perfil para inferência da vazão. O perfil pode ser caracterizado simplesmente pelos dados de temperatura do sistema de sensoriamento, que no caso da presente experimentação, consiste em todos os pontos quantos forem necessários ao longo do tubo.

Será utilizado o método de determinação de parâmetros de regressão linear, que será explicitado mais adiante, a fim de dispor-se de um método eficiente que teste os valores obtidos experimentalmente e determine com melhor precisão os valores de vazão para cada disposição térmica gerada pelo experimento.

Para a análise termográfica, vale ressaltar que é o método termográfico é aquele em que se pode obter a maior quantidade de pontos do que outro método de sensoriamento, limitando-se pela resolução da câmera utilizada para tal análise.

5.3.2 Inclinação do perfil

Aplicam-se os dados obtidos e determinados referentes aos pontos do perfil térmico existentes em mútua proximidade e simétricos em relação ao filamento aquecedor localizado na metade do tubo. Calcula-se, então, as inclinações do perfil gerado, através de derivadas discretas dos pontos de temperatura, onde obtém-se as seguintes equações:

$$T'_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1}; T'_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2}; T'_3 = \frac{\Delta T_3}{\Delta x_3}; \dots; T'_n = \frac{\Delta T_n}{\Delta x_n}$$

Vale ressaltar que tais equações são calculadas em ambos os lados do perfil gerado em relação ao elemento aquecedor, obtendo-se, portanto:

$$IP_{esq} = \sum_{n=1}^{146} T'_n \text{ e } IP_{dir} = \sum_{n=147}^{292} T'_n$$

Onde:

IP_{esq} representa a Inclinação do Perfil à esquerda do elemento aquecedor

IP_{dir} representa a Inclinação do Perfil à direita do elemento aquecedor

A Figura 46 representa um esboço de como as relações térmicas (T) em função da posição (x), sob a influência da vazão.

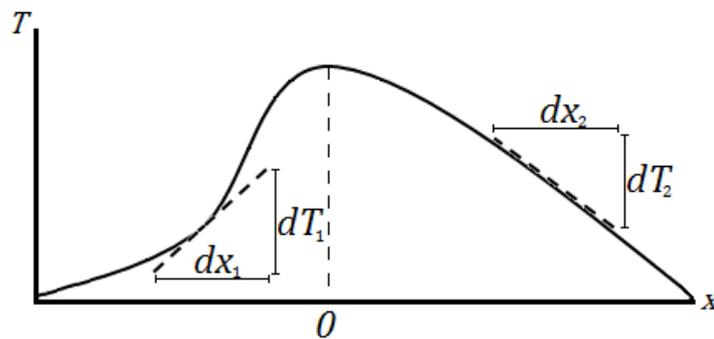


Figura 46: Inclinação de regiões do perfil

Consequentemente são definidas inclinações de regiões no perfil, relacionando-as à vazão, analogamente à Equação 19.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= f_{IP}(IP_{esq}, IP_{dir}) \\ \dot{m} &= \alpha_{11}IP_{esq} + \alpha_{12}IP_{dir} + \beta_1 \end{aligned} \quad (24)$$

A distribuição dos dados obtidos através do método de Inclinação do Perfil e sua relação com a vazão mássica está presente na Figura 47.

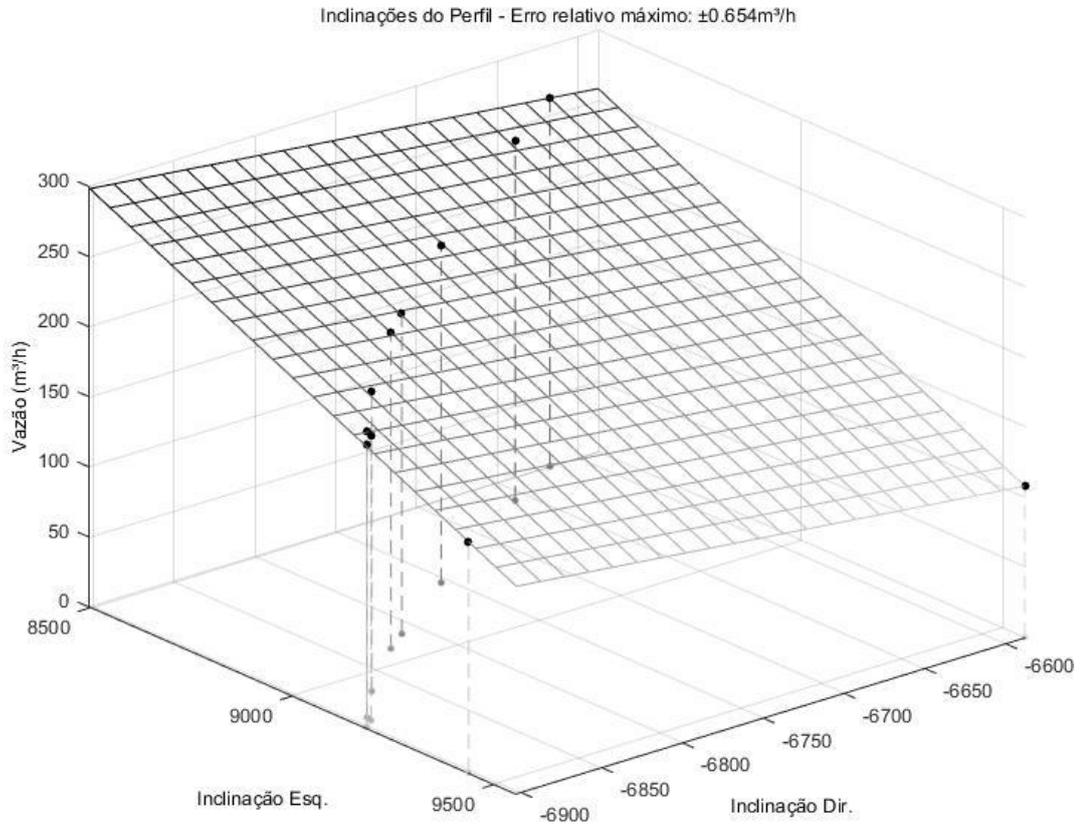


Figura 47: Gráfico de vazões pelo método de Inclinações do Perfil

Como o objeto deste estudo é avaliar a eficiência e aplicabilidade de um método proposto para medições de vazão mássica, o erro relativo significam a diferença entre a vazão que foi medida por instrumento de referência e a que foi calculada através dos métodos adequados propostos, como está representado na Figura 48.

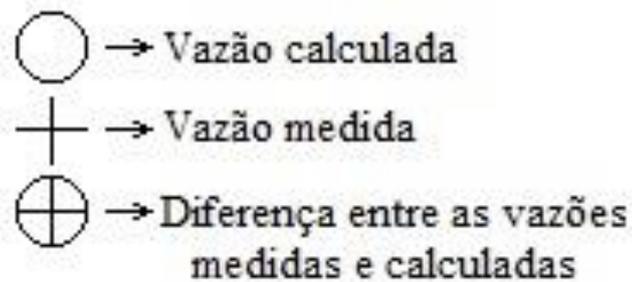


Figura 48: Representações de vazões medidas e calculadas

Na Figura 49 estão apresentadas as proporções de medição de vazão e os erros relativos entre as vazões medidas e calculadas através do MRL proposto.

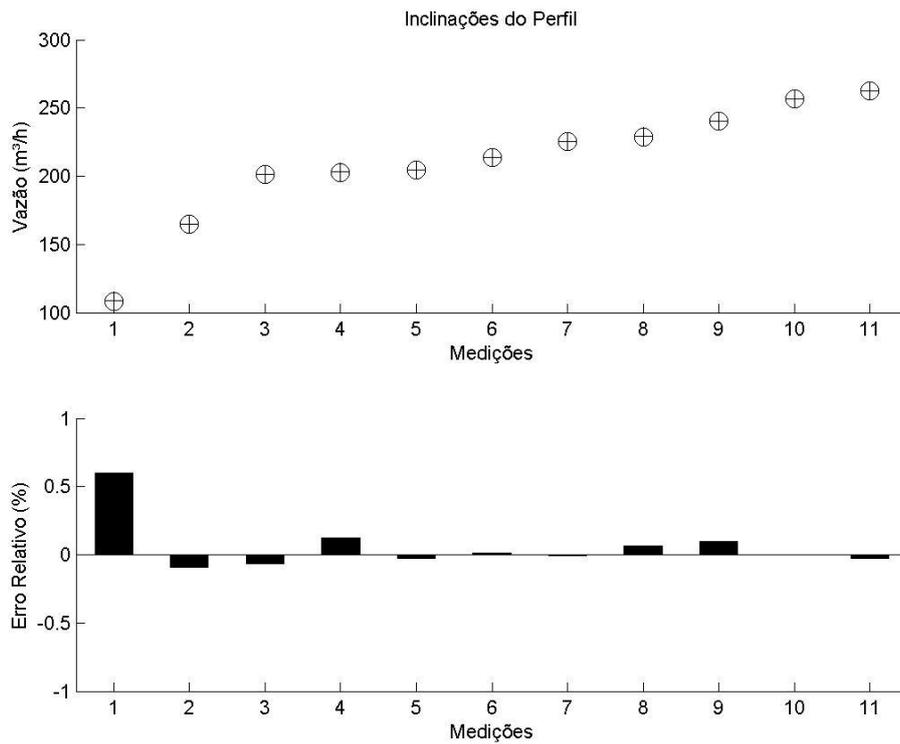


Figura 49: Erro de Inclinações do Perfil

5.3.3 Diferença de inclinações

Por meio da análise dos resultados pelas Inclinações do Perfil, obteve-se a Equação 24, onde α_1 e α_2 representam os coeficientes angulares, ou seja, o declive em cada lado do gráfico do modelo e β_l representa o coeficiente linear, que é a transladação da reta do modelo.

Procura-se, portanto, reduzir uma variável, por meio da aglutinação de α_{l1} e α_{l2} , utilizando a Diferença das Inclinações do perfil em cada lado do gráfico, gerando assim as equações:

$$\begin{aligned}
 DI &= (IP_{esq} - IP_{dir}) \\
 \dot{m} &= \alpha_{DI} DI + \beta_{DI}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Onde:

DI representa a Diferença de Inclinações dos lados do perfil.

A distribuição dos dados obtidos através do método de Diferença de Inclinações e sua relação com a vazão mássica está presente na Figura 50.

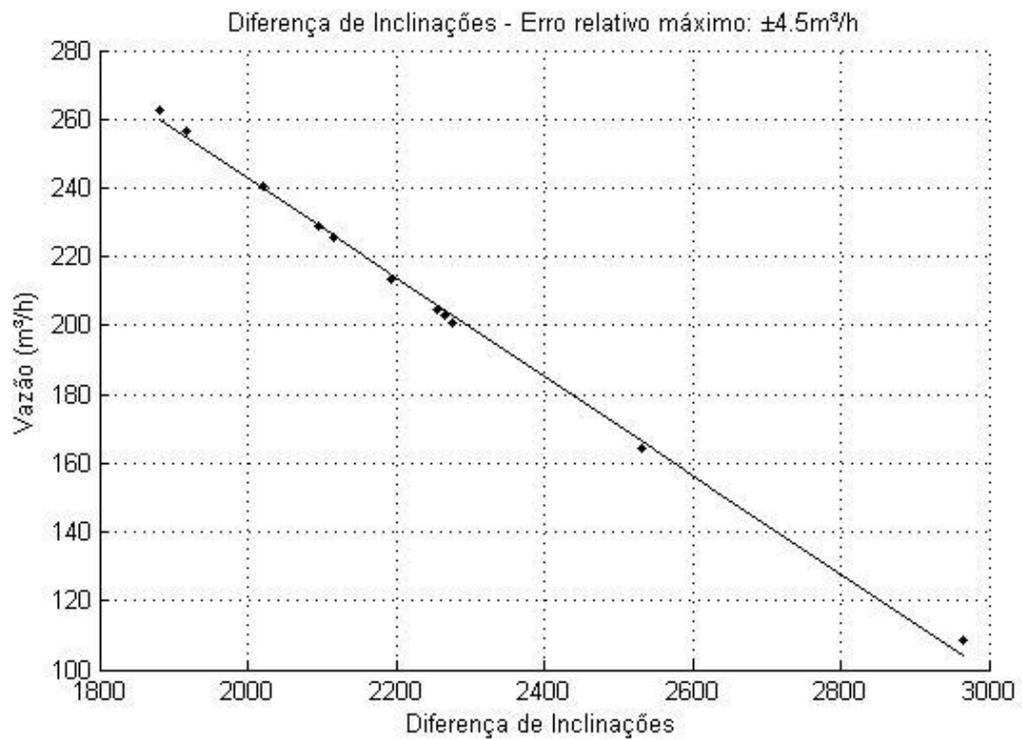


Figura 50: Gráfico de vazões pelo método de Diferença de Inclinações

Na Figura 51 estão apresentadas as proporções de medição de vazão e os erros relativos entre as vazões medidas e calculadas através do MRL proposto.

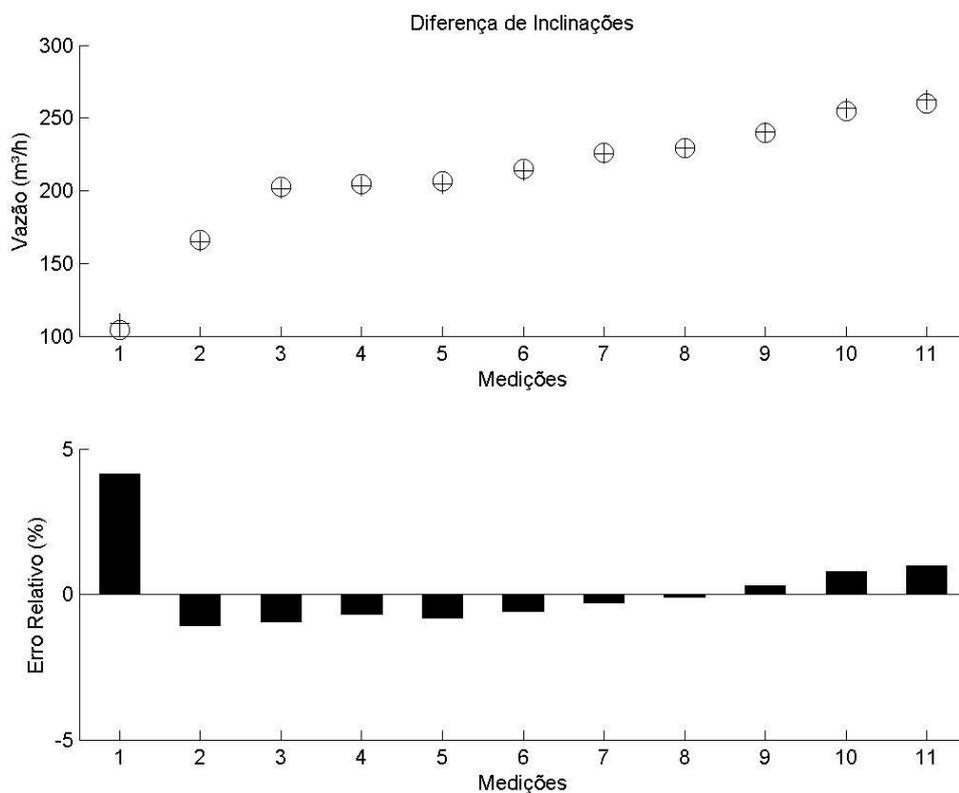


Figura 51: Erro de Diferença de Inclinações

5.3.4 Áreas do perfil

O perfil térmico gerado, representado graficamente através de curvas que relacionam as temperaturas medidas ao longo do tubo, pode ser analisado matematicamente por meio das áreas geradas entre a curva e o eixo das abcissas, onde a assimetria causada pelo resfriamento da vazão permite a definição da mesma.

A dimensão das áreas do gráfico em cada lado do centro, caracterizado pela posição do elemento aquecedor é obtido através do método de integração trapezoidal, onde serão separadas as Áreas à esquerda do elemento aquecedor (AP_{esq}) e à direita do elemento aquecedor (AP_{dir}), onde obtém-se as seguintes equações:

$$A_1 = \Delta T_1 \cdot \Delta x_1; A_2 = \Delta T_2 \cdot \Delta x_2; A_3 = \Delta T_3 \cdot \Delta x_3; \dots; A_n = \Delta T_n \cdot \Delta x_n;$$

Ao realizar-se tais cálculos em ambos os lados do perfil, obtém-se:

$$AP_{esq} = \sum_{n=1}^{146} \Delta T_n \cdot \Delta x_n \text{ e } AP_{dir} = \sum_{n=147}^{292} \Delta T_n \cdot \Delta x_n$$

A Figura 52 representa um esboço de como as relações térmicas (T) em função da posição (x), sob a influência da vazão.

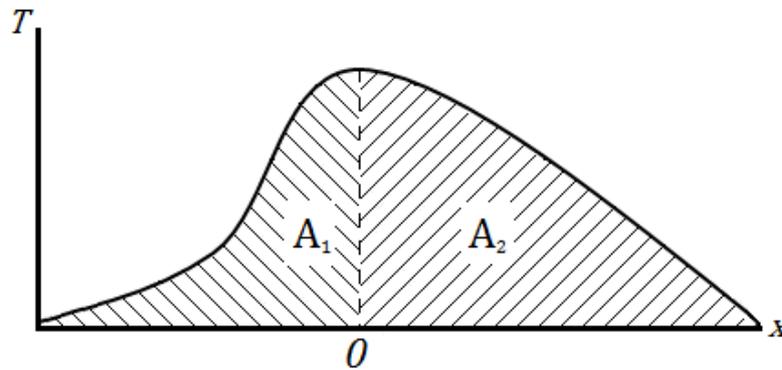


Figura 52: Áreas do perfil

Através das relações descritas, pode-se gerar a Equação análoga à Equação do MRL:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= f_{AP}(AP_{esq}, AP_{dir}) \\ \dot{m} &= \alpha_{A1} AP_{esq} + \alpha_{A2} AP_{dir} + \beta_A \end{aligned} \quad (26)$$

A distribuição dos dados obtidos através do método de análise de Áreas e sua relação com a vazão mássica está presente na Figura 53.

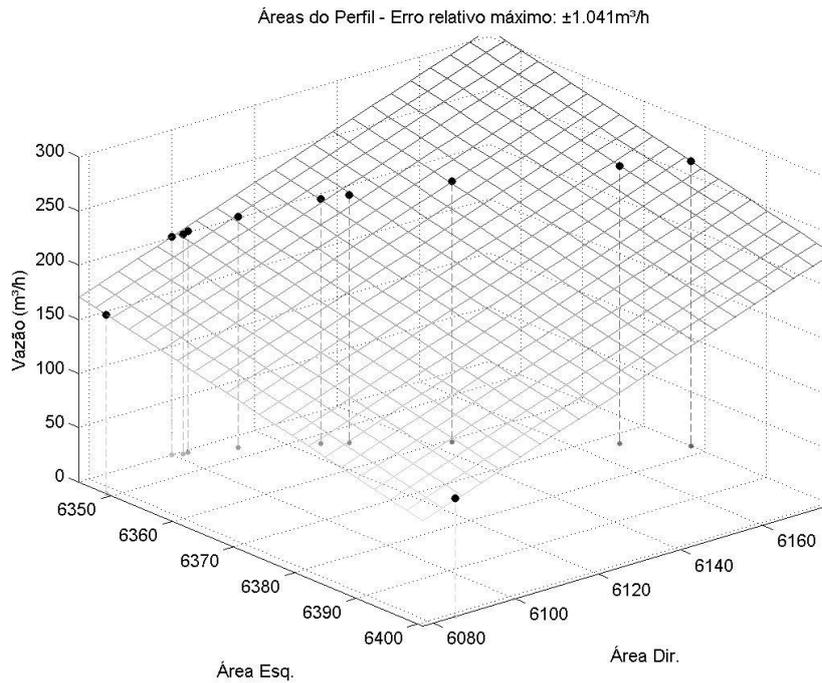


Figura 53: Gráfico de vazões pelo método de Áreas

Na Figura 54 estão apresentadas as proporções de medição de vazão e os erros relativos entre as vazões medidas e calculadas através do MRL proposto.

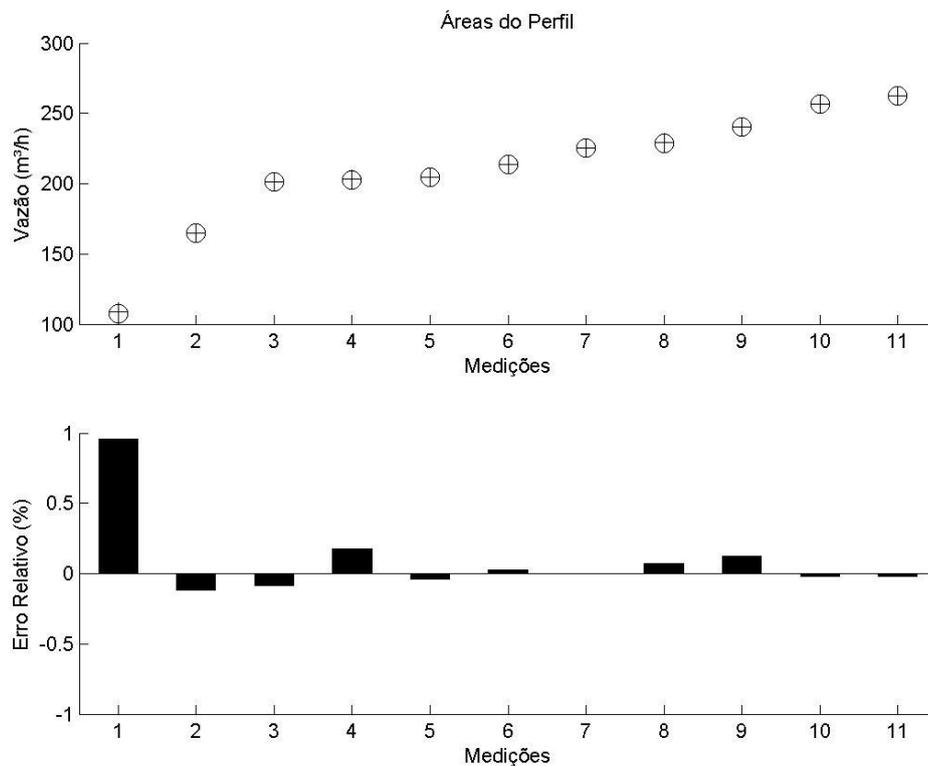


Figura 54: Erro de Áreas do Perfil

5.3.5 Diferença de áreas

Uma vez analisados os dados oriundos do método de Áreas do Perfil, a Equação 26, é possível identificar os coeficientes angulares referentes ao MRL múltiplo α_{A1} e α_{A2} e o coeficiente linear β_A , tornando possível reduzir uma variável, realizando uma aglutinação dos coeficientes angulares, através de relação matemática entre eles, gerando uma equação com o formato:

$$DA = (AP_{esq} - AP_{dir})$$

$$\dot{m} = \alpha_{DA} DA + \beta_{DA} \quad (27)$$

Sendo DA a Diferença de Áreas geradas em ambos os lados do perfil térmico.

A distribuição dos dados obtidos através do método de análise de Diferença de Áreas e sua relação com a vazão mássica está presente na Figura 55.

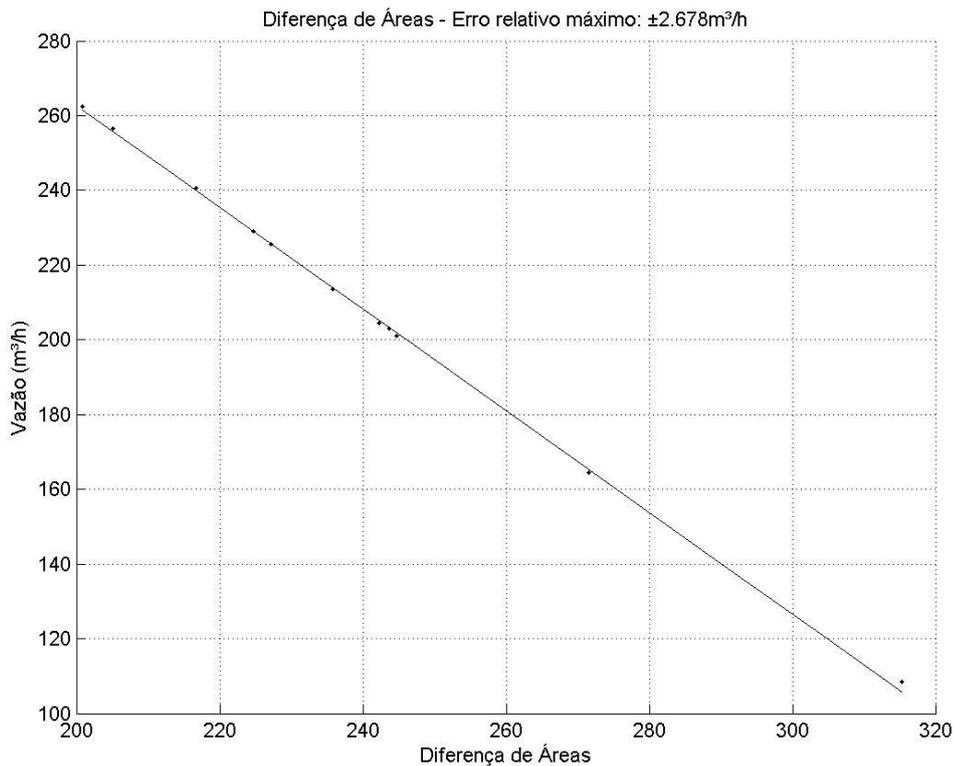


Figura 55: Gráfico de vazões pelo método de Diferença de Áreas

Na Figura 56 estão apresentadas as proporções de medição de vazão e os erros relativos entre as vazões medidas e calculadas através do MRL proposto.

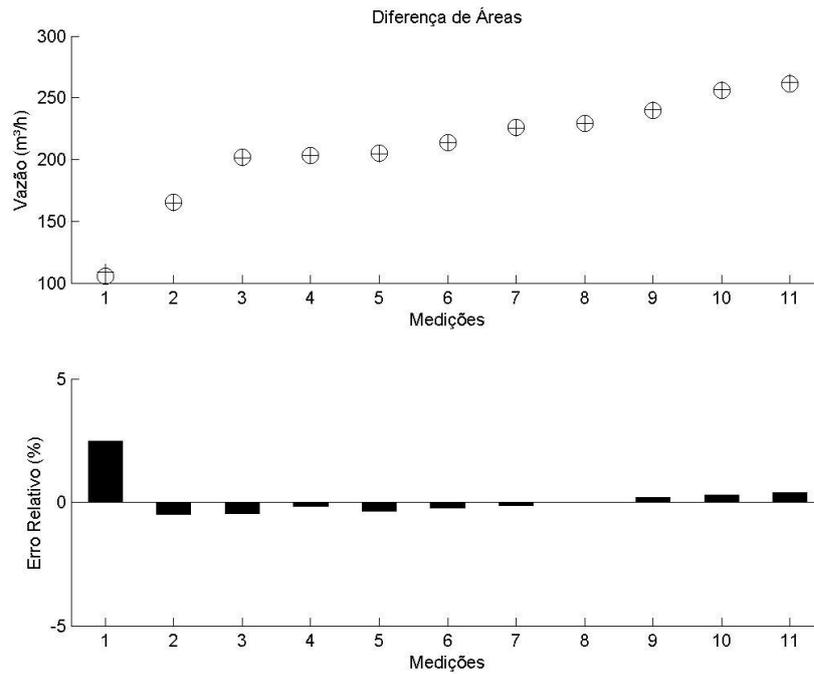


Figura 56: Erro de Diferença de Áreas

5.5 Comparação entre os resultados do MRL

Partindo do pressuposto de constância dos dados obtidos na experimentação, não havendo variação significativa, torna-se possível comparar os resultados obtidos nos diversos métodos empregados.

Confeccionou-se, para tal, a Tabela 2, de forma a apresentar os erros relativos máximos de fundo de escala de medição separando cada uma das características do perfil de temperaturas, tal qual a avaliação quantitativa da proporção entre as variáveis (R^2).

Tabela 2: Comparação dos erros relativos e proporções

Inclinação do Perfil	Erro ($\pm m^3/h$)	0,681
	Erro (%)	0,26%
	R^2	99,99%
Diferença de Inclinações	Erro ($\pm m^3/h$)	4,638
	Erro (%)	1,77%
	R^2	99,76%
Áreas	Erro ($\pm m^3/h$)	1,086
	Erro (%)	0,41%
	R^2	99,99%
Diferença de Áreas	Erro ($\pm m^3/h$)	2,803
	Erro (%)	1,07%
	R^2	99,95%

Através da comparação realizada entre os métodos aplicados, pode-se concluir que os resultados da aplicação do MRL diretamente dos quatro métodos utilizados (Inclinação do perfil; Diferença de Inclinações; Áreas e Diferença de Áreas) possuem excelente taxa de proporção (R^2), além de faixas de erro relativo melhores do que muitos medidores presentes no mercado atualmente, determinando, portanto, a eficiência do método e excelente aplicabilidade em todos os testes realizados com o protótipo.

Foi determinado através dos testes e da comparação entre os métodos que o MRL aplicado à Inclinação do Perfil apresenta a maior eficiência, explicitado através do menor erro relativo de fundo de escala.

Capítulo 6

Conclusão

Concluiu-se pelo desenvolvimento deste projeto a potencialidade da aplicação do método descrito para a medição de vazões tubulares. Uma vez que a propagação do erro (0,26% de erro relativo) se situa dentro do limite de erro de vários outros medidores comerciais, percebe-se a eficiência do método proposto.

Pela crescente necessidade no aprimoramento dos instrumentos de medição de vazão, percebe-se a demanda de tal equipamento em instalações específicas, acarretando determinadas exigências de projeto para a utilização do medidor. Por meio de tais exigências, detectou-se a importância do desenvolvimento de um método de medição que não necessitasse ser intrusivo ao escoamento.

O presente estudo desenvolveu e analisou um método específico que se mostrou de grande eficiência, através do exame em protótipo proposto pelo próprio estudo, de forma que atendesse à não intrusividade e que aplicasse metodologia que dispusesse da maior quantidade de pontos ao longo do tubo para análise.

A proposta da utilização da termografia computacional pela câmera FLIR® A-320 mostrou-se perfeitamente eficaz e atendeu à expectativa de leitura térmica de quantos pontos fossem necessários, sendo utilizados 292 pontos, descrevendo um perfil térmico que é apresentado graficamente.

O protótipo foi montado atendendo às especificações de projeto, tais quais: Fluxo em fluido gasoso, de ar; baixas vazões, entre 95 e 269,5 m^3/h ; pequenos diâmetros de tubo, de 1 1/4" de diâmetro nominal e tubo em material com excelente condutividade térmica, no caso o cobre, com $k_{Cu} \cong 400 W/m \cdot K$.

A análise foi realizada primeiramente pela observação dos fenômenos físicos descritos em fundamentação teórica de transferência de calor, onde o elemento aquecedor é ligado ainda sem a influência da vazão, permanecendo assim pelo tempo de estabilização térmica.

Após o tempo necessário para que toda a superfície do tubo esteja uniformemente aquecida, liga-se o emissor de fluxo, de maneira que haja resfriamento no tubo, originado em uma das extremidades do tubo, na qual está conectado o emissor de fluxo.

A partir daí o aquecimento gera o fenômeno da condução térmica enquanto a vazão de ar provoca o fenômeno da convecção térmica. Os fenômenos combinados geram uma variação térmica que é o principal objeto de estudo deste trabalho.

Uma placa de aquisição de dados foi utilizada para prover o controle da potência de aquecimento, que foi monitorada em tempo real por sensores térmicos de precisão para que ao alcançar um valor estipulado, o aquecimento se estabilizasse. A placa também controlou a velocidade de rotação do emissor de fluxo, e conseqüentemente, a intensidade da vazão.

Para a aquisição de dados térmicos, foi utilizada uma câmera termográfica, que foi capaz de ler tantos pontos de temperatura quantos fossem estipulados, portanto apresentou-se como um eficiente método de obtenção de dados, possibilitando a plotagem de uma curva gráfica que denota a distribuição térmica ao longo do tubo.

O processamento dos dados obtidos foi realizado computacionalmente, de forma que foram escolhidos quatro métodos de relações matemáticas para análise do perfil térmico, onde a aplicação de um Modelo de Regressão Linear avalia um conjunto de dados fornecido para criar um modelo aplicável a todos os valores de vazão impostos ao sistema proposto.

Através dos resultados de todas as etapas de análise do projeto, concluiu-se que o método de análise pelo Modelo de Regressão Linear aplicado às Inclinações do Perfil foi o mais eficiente, apresentando valores de erro relativo de fundo de escala menores do que 1% para as medições de vazão.

No intuito de sugerir potenciais otimizações ao método estudado e sua análise, pode-se esboçar propor trabalhos futuros:

- Montagem de protótipo de escoamento com fluidos bifásicos;
- Aumento na resolução gráfica na aquisição de dados, obtendo-se assim mais pontos do Perfil Térmico para serem analisados;
- Processamento de dados a cada ponto do perfil térmico gerado e diferença entre tais pontos;
- Realizar redundância na aquisição de dados, combinando a leitura termográfica com medições através de sensores térmicos ao longo do tubo;
- Aumento do *range* dos valores de vazão para análise dos diferentes efeitos em baixas e altas vazões e, dessa forma determinar o ponto de saturação do modelo;
- Aprofundamento metrológico dos componentes utilizados no protótipo.

Referências Bibliográficas

- [1] ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUZA, A. R.. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. 1ª ed., Editora Manole, São Paulo, 2008.
- [2] AWWA. *Flowmeters in Water Supply*. 1ª ed., Denver, American Water Works Association, 1989.
- [3] CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O. *Medição de Vazão*. Controle & Instrumentação v. 138, 2008.
- [4] CORIOLIS, G.G.. *Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps*. Journal de l'école Polytechnique, Vol 15, 1835. p. 142-154
- [5] FERREIRA, F. R., *Vazão e os Instrumentos de Medição*. Universidade do Vale do Rio Doce, Faculdade de Engenharia de Produção, Governador Valadares, MG, Brasil, 2012.
- [6] GIANCOLI, DOUGLAS C., *Physics*, 4ª ed, Prentice Hall, 1995.
- [7] HAUPTMANN, P.; HOPPE, N.; PUETTMET. *Ultrasonic Sensor for Process Industry*. *IEEE Ultrasonic Symposium*, Vol. 1, pp:369-378, 2001.
- [8] IBARS, R. A. F.: *Desevolvimento e Avaliação de Tubos Venturi para Medição de Vazão*, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, SP, Brasil, 2004.
- [9] INCROPERA, F.P. “Internal Flow,” in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., LTC, 2011, pp. 71-72, pp. 486–502.
- [10] LOPES, M.G., *Medidores de vazão*. Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, PA, Brasil, 2011.
- [11] MOAZZENI, T.; JIAN M.; YINGTAO J., *Measurement and Calibration of Thermal Cross-Correlation-Based Flowmeter Operating in Harsh Environment*, *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on , vol.62, no.8, pp.2280- 2285, Aug. 2013.
- [12] NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia estatística*, CPRM, Belo Horizonte, 2007.
- [13] NGUYEN, Nam-Trung. *Flow Measurement*, 28.9, by CRC Press LLC, 1999.
- [14] NIETO, A. R., *Guiones de las prácticas del Laboratorio de Mecánica de fluidos*. Universidad de Navarra – Escuela Superior de Ingenieros. San Sebastián, 2008.
- [15] OLIVEIRA, M.A.A ; AMARAL, J. L. M. *Auto-ajuste de Sensores*. In: Flávio Vasconcelos; Raimundo C. S. Freire; Sebastian Y.C. Catunda. (Org.). *Metrologia e instrumentação: tópicos selecionados*. 1 ed. Campina Grande: EDUFCEG, v. 1, p. 67-94, 2010.
- [16] PATERNELLI, L.A. Notas de Aula de Estatística I: Capítulo 9 - Regressão e Correlação. <http://www.dpi.ufv.br/~paterneli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>, Acesso em 05/04/2015.

- [17] QUIRINO, T. M.: *Desenvolvimento de um medidor de vazão não intrusivo utilizando calorimetria inteligente*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- [18] RACHALSKI, A. 2006. *High-precision anemometer with thermal wave.*, Rev. Sci. Instrum., 77, 095107-1.
- [19] ROSÁRIO, J. M. *Automação industrial*. São Paulo: Editora Baraúna, 2009. p. 62-71.
- [20] SERFATY, R., *Medição de Vazão*. Geinp/Gein-n, 1996.
- [21] VIANA, U. B., *Instrumentação Básica II - Vazão, Temperatura e Analítica - Instrumentação*, SENAI - ES/CST, 1999.

APÊNDICE A: Código de monitoramento e controle

```

const int LM35 = A4; // //Determina o pino analógico no qual estará ligado o LM35
const int BUFFER_SIZE = 1000; //Quantidade de vezes que vai ler para criar a média
const int REFRESH_RATE = 2000; //Tempo de atualização entre as leituras em ms
const float CELSIUS_BASE = 0.3211914; //Base de conversão para Graus Celsius
int motorPin = 3; //Determina o pino no qual estará ligado o emissor de fluxo
int aquecAr = 4; //Determina o pino no qual estará ligado o elemento aquecedor
int LED = 13; //Pino de comando do LED embutido

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A4, INPUT);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);
  pinMode(aquecAr, OUTPUT);
  pinMode(LED, OUTPUT); //só para o led embutido piscar junto
}

void loop() {
  if(CheckTemp() > 50){//Verifica se a Temperatura é maior do que 50°C
    digitalWrite(aquecAr, LOW); //Se for, desliga o aquecimento
  }
  if(CheckTemp() <= 49.9){//Verifica se a Temperatura é menor do que 49,9°C
    digitalWrite(aquecAr, HIGH); //Se for, liga o aquecimento
  }
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.println(CheckTemp());
  delay(REFRESH_RATE);
  digitalWrite(aquecAr, LOW);
  digitalWrite(LED,LOW); //LED
  analogWrite(motorPin, 0);
  delay(1000);
  digitalWrite(aquecAr, LOW);
  digitalWrite(LED,HIGH); //LED
  analogWrite(motorPin, 0);
  delay(1000);
}

float CheckTemp(){
  return (analogRead(LM35) * CELSIUS_BASE);
}

float readTemperatureWithBuffer(){
  float buffer = 0;
  for (int i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++){
    buffer += analogRead(LM35);
  }
  return ((buffer/BUFFER_SIZE) * CELSIUS_BASE);
}

```

ANEXO A: Catálogo de tubos de cobre

Tubos de Cobre HIDROLAR®



Os tubos de cobre **HIDROLAR®** são rígidos, **sem costura**, fabricados pelo processo de extrusão e em seguida calibrados nos diâmetros comerciais por trefilação. São produzidos de acordo com a norma ABNT-NBR 13206*. Comercializados em barras de 2,5 e 5,0 metros.

Diâmetro Nominal		CLASSE E			CLASSE A			CLASSE I		
pol	mm	Diâmetro Externo x Esp. Parede mm	Peso kg/m	Pressão Serviço kgf/cm ²	Diâmetro Externo x Esp. Parede mm	Peso kg/m	Pressão Serviço kgf/cm ²	Diâmetro Externo x Esp. Parede mm	Peso kg/m	Pressão Serviço kgf/cm ²
1/2"	15	15 x 0,50	0,203	41	15 x 0,80	0,318	69	15 x 1,00	0,392	88
3/4"	22	22 x 0,60	0,360	34	22 x 0,90	0,532	50	22 x 1,10	0,644	60
1"	28	28 x 0,60	0,460	26	28 x 0,90	0,683	40	28 x 1,20	0,901	55
1 1/4"	35	35 x 0,70	0,673	25	35 x 1,10	1,045	40	35 x 1,40	1,318	45
1 1/2"	42	42 x 0,80	0,923	24	42 x 1,10	1,261	35	42 x 1,40	1,593	42
2"	54	54 x 0,90	1,339	21	54 x 1,20	1,775	28	54 x 1,50	2,206	34
2 1/2"	66	66,7 x 1,00	1,839	20	66,7 x 1,20	2,200	24	66,7 x 1,50	2,737	28
3"	79	79,4 x 1,20	2,627	19	79,4 x 1,50	3,271	24	79,4 x 1,90	4,122	27
4"	104	104,8 x 1,20	3,480	14	104,8 x 1,50	4,337	18	104,8 x 2,00	5,755	20

*Tubos de cobre sem costura, conforme Normas de Instalações Hidráulicas e Gás da ABNT.

De acordo com a aplicação e identificação do tubo de cobre, são especificadas suas classes. Salvo indicação do projetista hidráulico, normalmente são utilizados para:



TUBOS CLASSE E

Identificados por tampões plásticos na cor Verde.

Instalações de água fria e água quente, gases combustíveis, instalações de combate a incêndio por hidrante e *sprinklers*.

ANEXO B: Especificações da placa de aquisição de dados (Arduino)

Arduino New Products



Arduino DUE

The Arduino Due is the newcomer microcontroller board in the Arduino boards family. It's the first board based on a 32 bit processor (Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 MCU), which improves all the standard Arduino functionalities and adds many new features.

The arduino DUE offers 54 digital input/output pins (of which 16 can be used as PWM outputs, with selectable resolution), 12 analog inputs with 12 bits of resolution, 4 UARTs (hardware serial ports), two DAC (digital to analog converter) outputs, an 84 MHz crystal oscillator, two USB connections, a power jack, an ICSP header, a JTAG header, and a reset button.

The Due has two micro USB connectors: one intended for debugging purposes and a second one capable of acting as a USB host, allowing external USB peripherals such as mouse, keyboards, smartphones, etc. to be connected to the Arduino Due.

More information will be soon on line at the page <http://arduino.cc/ArduinoDUE>

Technical Specifications

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 16 provide PWMoutput)
Analog Input Pins	12
Analog Outputs Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	theoretical 1A, realistic 800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (64 + 32 KB)
DataFlash	2 Mbit (250 KB)
Clock Speed	84 MHz



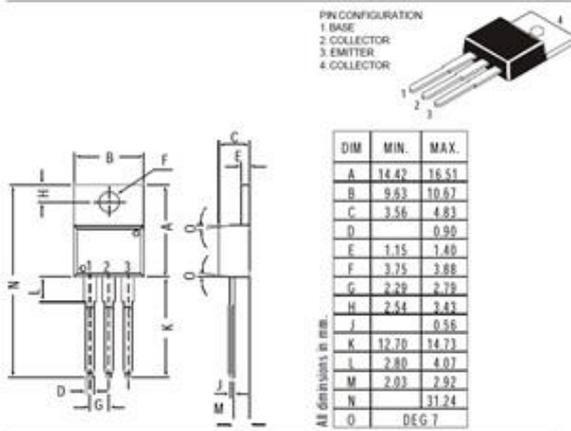
ANEXO C: Especificações do transistor de controle (TIP122)

Boca Semiconductor Corp.

TIP120, 121, 122 NPN PLASTIC POWER TRANSISTORS

TIP125, 126, 127 PNP PLASTIC POWER TRANSISTORS

Power Darlington for Linear and Switching Applications



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

	120	121	122	125	126	127
Collector-base voltage (open emitter)	V_{CBO}	max. 60	80	100	V	
Collector-emitter voltage (open base)	V_{CEO}	max. 60	80	100	V	
Collector current	I_C	max.	5.0	A		
Total power dissipation up to $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	max.	65	W		
Junction temperature	T_j	max.	150	$^\circ\text{C}$		
Collector-emitter saturation voltage $I_C = 3\text{ A}; I_B = 12\text{ mA}$	V_{CEsat}	max.	2.0	V		
D.C. current gain $I_C = 0.5\text{ A}; V_{CE} = 3\text{ V}$	h_{FE}	min.	1.0			

RATINGS (at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

	120	121	122	125	126	127
Collector-base voltage (open emitter)	V_{CBO}	max. 60	80	100	V	
Collector-emitter voltage (open base)	V_{CEO}	max. 60	80	100	V	
Emitter-base voltage (open collector)	V_{EB0}	max.	5.0	V		
Collector current	I_C	max.	5.0	A		
Collector current (peak)	I_{CM}	max.	8	A		
Base current	I_B	max.	120	mA		
Total power dissipation up to $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	max.	65	W		
Derate above 25°C		max.	0.52	$\text{W}/^\circ\text{C}$		
Total power dissipation up to $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	max.	2	W		
Derate above 25°C		max.	0.016	$\text{W}/^\circ\text{C}$		
Junction temperature	T_j	max.	150	$^\circ\text{C}$		
Storage temperature	T_{stg}		-65 to +150	$^\circ\text{C}$		

THERMAL RESISTANCE

From junction to ambient	R_{thj-a}	62.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$
From junction to case	R_{thj-c}	1.92	$^\circ\text{C}/\text{W}$

CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

	120	121	122	125	126	127
Collector cutoff current $I_B = 0; V_{CB} = 60\text{ V}$	I_{CBO}	max. 0.2	-	-	mA	
$I_B = 0; V_{CB} = 80\text{ V}$	I_{CBO}	max.	-	0.2	mA	
$I_B = 0; V_{CB} = 100\text{ V}$	I_{CBO}	max.	-	0.2	mA	
$I_B = 0; V_{CE} = 20\text{ V}$	I_{CEO}	max.	0.5	-	mA	
$I_B = 0; V_{CE} = 40\text{ V}$	I_{CEO}	max.	-	0.5	mA	
$I_B = 0; V_{CE} = 50\text{ V}$	I_{CEO}	max.	-	-	0.5	mA
Emitter cut-off current $I_C = 0; V_{EB} = 5\text{ V}$	I_{EBO}	max.	2.0	mA		
Breakdown voltages $I_C = 100\text{ mA}; I_B = 0$	$V_{CE0(sat)}^*$	min.	60	80	100	V
$I_C = 1\text{ mA}; I_E = 0$	V_{CBO}	min.	60	80	100	V
$I_E = 1\text{ mA}; I_C = 0$	V_{EBO}	min.	5.0	V		
Saturation voltages $I_C = 3.0\text{ A}; I_B = 12\text{ mA}$	V_{CEsat}^*	max.	2.0	V		
$I_C = 5.0\text{ A}; I_B = 20\text{ mA}$	V_{CEsat}^*	max.	4.0	V		
Base-emitter on voltage $I_C = 3\text{ A}; V_{CE} = 3\text{ V}$	$V_{BE(on)}^*$	max.	2.5	V		
D.C. current gain $I_C = 0.5\text{ A}; V_{CE} = 3\text{ V}$	h_{FE}^*	min.	1.0			
$I_C = 3\text{ A}; V_{CE} = 3\text{ V}$		min.	1.0			
Small signal current gain $I_C = 3\text{ A}; V_{CE} = 4\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$	$ h_{fe} $	min.	4.0			
Output capacitance at $f = 0.1\text{ MHz}$ $I_E = 0; V_{CB} = 10\text{ V}$	C_o	max.	300	pF		
	C_o	max.	200	pF		

* Pulse test: pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

ANEXO D: Especificações do sensor térmico de precisão (LM35)



www.fairchildsemi.com

LM350 3-Terminal 3A Positive Adjustable Voltage Regulator

Features

- Output Adjustable Between 1.2V and 33V
- Overvoltage 3A Output Current
- Internal Thermal-Overload Protection
- Load Regulation (Typ: 0.1%)
- Line Regulation (Typ: 0.01%/V)
- Internal Short Circuit Current Limit
- Output Transistor Safe-Area Compensation

Description

The LM350 is an adjustable 3-terminal positive voltage regulator capable of supplying in excess of 3.0A over its output voltage range of 1.2V to 33V.



LM350

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input-Output Voltage Differential	$V_I - V_O$	35	VDC
Lead Temperature (Soldering, 10sec)	T_{LEAD}	300	°C
Power Dissipation	P_D	Internally limited	-
Operating Temperature Range	T_{OPR}	0 ~ +125	°C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 ~ +150	°C

Electrical Characteristics

($V_I - V_O = 5V$, $I_O = 1.5A$, $T_J = 0^\circ C$ to $+125^\circ C$, $P_D \leq P_{DMAX}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Line Regulation (Note 1)	Rline	$T_A = +25^\circ C$, $3V \leq V_I - V_O \leq 35V$	-	0.015	0.03	%/V
Load Regulation (Note 1)	Rload	$T_A = +25^\circ C$, $3V \leq V_I - V_O \leq 35V$ $V_O \leq 5V$ $V_O \geq 5V$	-	0.1	0.5	%
Adjustment Pin Current	I_{ADJ}	-	-	50	100	μA
Adjustment Pin Current Change	ΔI_{ADJ}	$3V \leq V_I - V_O \leq 35V$, $10mA \leq I_O \leq 3A$, $P_D \leq P_{MAX}$	-	0.2	5.0	μA
Thermal Regulation	REGT	Pulse = 20ms, $T_A = +25^\circ C$	-	0.002	-	%/W
Reference Voltage	V_{REF}	$3V \leq V_I - V_O \leq 35V$, $10mA \leq I_O \leq 3A$, $P_D \leq 30W$	1.2	1.25	1.30	V
Line Regulation	Rline	$3.0V \leq V_I - V_O \leq 35V$	-	0.02	0.07	%/V
Load Regulation	Rload	$10mA \leq I_O \leq 3.0A$ $V_O \leq 5.0V$ $V_O \geq 5.0V$	-	0.3	7.0	%
Temperature Stability	ST _T	$T_J = 0^\circ C$ to $+125^\circ C$	-	1.0	-	%
Maximum Output Current	$I_{O(MAX)}$	$V_I - V_O \leq 10V$, $P_D \leq P_{MAX}$	3.0	4.5	-	A
Minimum Load Current	$I_{O(MIN)}$	$V_I - V_O = 35V$	-	3.5	10	mA
RMS Noise, % of V _O	V_N	10Hz $\leq f \leq$ 10kHz, $T_A = +25^\circ C$	-	0.003	-	%/V _O
Ripple Rejection	RR	$V_O = 10V$, $f = 120Hz$, $CADJ = 0$ $CADJ = 10\mu F$	66	80	-	dB
Long-Term Stability	ST	$T_J = +125^\circ C$	-	0.3	1	%/1000HR

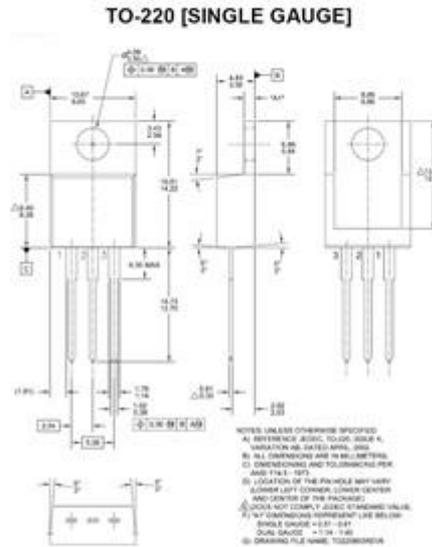
Note:
1. Regulation is measured at constant junction temperature. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with 50% duty cycle is used.

LM350

Mechanical Dimensions

Package

Dimensions in millimeters



ANEXO E: Especificações da câmera termográfica (A320)



Quem irá se beneficiar com esta tecnologia?

A FLIR A320 é ideal para qualquer indústria onde a prevenção a incêndios, o gerenciamento efetivo de ativos e o monitoramento preditivo permanentemente são importantes. As aplicações e os usuários típicos são:

Petróleo e Gás
Exploração e refinarias de petróleo, unidades petroquímicas, processamento, transporte e armazenamento de gás natural

- Prevenção a incêndios em áreas de armazenamento
- Monitoramento de revestimento do refratário
- Deteção de chamas
- Controle de qualidade de processo
- Prevenção de incêndios em pilhas de coque e carvão

Geração e Distribuição de Energia

- Prevenção a incêndios em áreas de armazenamento de madeira
- Prevenção a incêndios em áreas de armazenamento de resíduos
- Monitoramento de subestação
- Monitoramento de equipamento com missão crítica



Imagem infravermelha de uma labareda

Especificações FLIR A320

Desempenho da Imagem	
Campo de Visão	Embutido 25° x 18.8°/0.4m (1.3 ft.)
Foco	Auto foco, manual motorizado
Sensibilidade Térmica	70 mK @ +30° C
IFOV (com lentes 25°)	1,36 mrad
Tipo de Detector	Microbolometro de Arranjo de Plano Focal (FPA), não resfriado
Faixa Espectral	7.5 a 13.0 µm
Resolução	320x240 pixels
Medição	
Faixas de Temperatura	-20°C to +120°C (-4°F to 248°F) 0°C to +350°C (32°F to 662°F) Optional up to +1200°C (2192°F)
Precisão (% da leitura)	±2°C ou ±2%
Apresentação de Imagens	
Video Composto	PAL/ NTSC (25/30 Hz ou 9 Hz)
MPEG-4	RTSP/ RTP/ UDP Velocidade de projeção: dependendo do conjunto de qualidade da imagem (compressão e tamanho) e largura de banda disponível na rede. Tamanho da imagem: 640x480/320x240/160x120.
Sinal de 16-bit com dados radiométricos, propriedade FLIR	Velocidade de projeção: Máxima (7.5-8.5 Hz/5 Hz/2 Hz) / Hz 0.5 Hz/0.2 Hz, 0.1 Hz.
Sinal TCP/IP de 16-bits (DirectX)	Tamanho da imagem: 320x240/160x120. O que é conseguido depende do tamanho do conjunto de qualidade da imagem e largura de banda da rede disponível e carga de CPU
Temperatura linear TCP/IP (DirectX) de 16-bits	
Funcionalidade de E/S	
Saída Digital: 2 Saídas, Opto-isoladas, 10-30V, 100 mA	Alarme (Temp. interna, Entrada analógica, entrada digital) Contr. programa.
Entrada Digital: 2 Entradas, Opto-isoladas, 10-30V	Lote Armarzenar imagem ALARME Marcar imagem (iniciar/parar tempo)

Lentes adicionais

- Lente de 15°
- Lente de 45°
- Maleta



Ambiental

Faixa Operacional de Temperatura	-15°C a +50°C (+5°F a +122°F)
Faixa de Temperatura de Armazenamento	-40°C a +70°C (-40°F a +158°F)
Umidade (operacional e armazenamento)	IEC 60068-2-30/24 h 95% umidade relativa +25°C a +40°C (+77°F a +104°F)
Encapsulamento	IP 40 (IEC 60529)
Choque	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibração	2 g (IEC 60068-2-6)
EMC	EN 61000-6-2:2001 (Imunidade) EN 61000-6-3:2001 (Emissão), FCC 47 CFR Part 15 Class B (Emission)

Características Físicas

Peso, total para sistema operacional	0.7 kg (1.54 lb.)
Tamanho, Corpo da câmera incluindo alça, C x L x A	170 x 70 x 70 mm (6.7 x 2.8 x 2.8 in.)
Montagem da Base	2 x M4 orifícios rosqueados de montagem (em três lados)
Montagem do Tripé	UNC 1/4"-20 (em três lados)

Componentes Incluídos

Eletricidade 90-220V AC in, 12V out	Part No. 1910585
Cabo de alimentação	Padrão 2-fios c/ terra
Cabo de alimentação "pigtailed"	Part No. 1910586
Cabo do vídeo	BNC, 2m
Cabo ethernet	CAT-5e, 2m
CD utilitário com drivers	Programas IP Config e IR Monitor

Acessórios

Lentes Telefoto, 15-graus	1196724
Lente Grande Angular, 45-graus	1196725
Maleta	1196940
ThermoVision SDK Toolkit	
ThermoVision LabView Toolkit	
ThermaCAM Researcher, v2.9V Professional	

FLK Instrumentação Eletrônica Ltda.
Rua Conde de Lages 44, Glória
Rio de Janeiro-RJ
(21) 2224-1801
www.flk-rio.com.br - vendas@flk-rio.com.br

TODAS AS ESPECIFICAÇÕES ESTÃO SUJEITAS A ALTERAÇÃO SEM AVISO PRÉVIO.
© Direitos autorais de 2004 FLIR Systems, Inc. Todos os outros marcas e nomes de produtos são marcas registradas dos seus respectivos proprietários.
1917P-CAT-SA-100N-A-P-2200-04/2010-1917-35